



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones

PROYECTO FIN DE CARRERA

Modelado y estudio de canales realistas en sistemas mmMIMO

Autor: Jesús García Jiménez

Tutor: Matilde Pilar Sánchez Fernández

Leganés, Julio de 2014

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a mi familia el haberme ayudado en todo lo posible a formarme como persona y a apoyarme en todo momento a lo largo no solo de estos últimos años, sino durante toda mi vida.

Por otro lado, agradecer también a mis amigos el apoyo recibido durante estos años y el estar a mi lado en todo momento.

También, como no, agradecer a mis compañeros por todos esos días de biblioteca que hemos pasado juntos, así como el habernos ayudado mutuamente a que el estudio sea un poco más ameno y menos duro, y por todas esos buenos momentos que hemos pasado juntos.

Y por último, pero no menos importante, agradecer a mi tutora todo lo que ha hecho por este proyecto, sin ninguna queja y dispuesta a contestar a cualquier pregunta con una sonrisa.

Resumen

La necesidad de aumentar el conjunto de frecuencias posibles a utilizar como consecuencia de tener el espectro por debajo de 3 GHz saturado, unido al gran aumento de capacidad que proporcionan los sistemas MIMO, hacen que el estudio de ondas milimétricas en sistemas MIMO sea necesario, para poder tener una mayor utilización del espectro de una manera eficiente. Las ondas milimétricas nos dan el suficiente rango de frecuencias (3-300 GHz) como para poder, en un futuro, utilizar dicho espectro en nuevas tecnologías. Este proyecto pretende estudiar el efecto de utilizar ondas milimétricas en sistemas MIMO, realizando un estudio de prestaciones en dicho sistema, y ver si es viable utilizar ondas milimétricas y en qué casos vendría bien utilizarlas. También veremos cómo se realiza el conformado de haz en el sistema y en qué caso vendría bien utilizarlo.

Palabras clave: MIMO, ondas milimétricas, conformado de haz, capacidad

Abstract

The necessity to increase the range of frequencies to use as result of have swamped the frequencies spectrum under 3 GHz, connected to significant growth of capacity provides by MIMO systems, makes necessary the study of millimeter waves in MIMO systems to have greater efficiency use of the spectrum. Millimeter waves could provide us enough frequencies range (3-300 GHz) to use this spectrum in the future in new technologies. This project study the effect of use millimeter waves in MIMO systems, making a study of facilities in this system and see if is viable to use millimeter waves and when works well. Also we see how makes beamforming in the system and when works well.

Keywords: MIMO, millimeter waves, beamforming, capacity

Índice general

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	166
1.1 Introducción	166
1.2 Objetivos	166
1.3 Fases de desarrollo	17
1.4 Medios empleados.....	17
1.5 Estructura de la memoria	17
2. SISTEMAS MIMO.....	19
2.1 Introducción	19
2.2 Sistemas MIMO.....	20
2.2.1 Definición de sistemas MIMO.....	20
2.2.2 Principio de funcionamiento.....	20
2.2.3 Ventajas de los sistemas MIMO.....	21
2.2.3.1 Ganancia por multiplexación espacial.....	21
2.2.3.2 Ganancia por diversidad.....	21
2.2.3.3 Ganancia de array	22
2.2.3.4 Reducción de interferencia.....	23
2.2.3.5 Solución de compromiso.....	23
2.3 Conformado de haz en sistemas MIMO.....	23
3. ONDAS MILIMÉTRICAS.....	25
3.1 Introducción	25
3.2 Espectro de ondas milimétricas.....	26
3.3 Propagación en ondas milimétricas.....	27
3.3.1 Propagación en espacio libre.....	27
3.3.2 Penetración y otras pérdidas.....	27
3.3.3. Doppler y multitrayecto.....	29
4. MODELO DEL SISTEMA	30
4.1 Introducción	30
4.2 Modelo de canal.....	31
4.2.1 Matriz de canal.....	31

4.2.2	Correlación de canal.....	32
4.2.3	Matriz de covarianza de entrada del canal.....	32
4.2.3.1	Channel State Information at the Transmitter (CSIT).....	32
4.2.3.2	Channel Distribution Information at the Transmitter (CDIT).....	34
4.2.3.3	Canal desconocido en el transmisor.....	35
4.2.4	Capacidad de canal.....	35
4.2.3.1	Channel State Information at the Transmitter (CSIT).....	36
4.2.3.2	Channel Distribution Information at the Transmitter (CDIT).....	36
4.2.3.3	Canal desconocido en el transmisor.....	36
5.	RESULTADOS.....	38
5.1	Escenario de simulación.....	38
5.2	Resultados.....	41
5.2.1	Dispersión angular a).....	42
5.2.1.1	M=N=3.....	42
5.2.1.1.1	CDIT.....	42
5.2.1.1.2	CSIT.....	43
5.2.1.1.3	Sin información del canal en el transmisor.....	44
5.2.1.2	M=N=4.....	46
5.2.1.2.1	CDIT.....	46
5.2.1.2.2	CSIT.....	47
5.2.1.2.3	Sin información del canal en el transmisor.....	48
5.2.1.3	M=N=6.....	50
5.2.1.3.1	CDIT.....	50
5.2.1.3.2	CSIT.....	51
5.2.1.3.3	Sin información del canal en el transmisor.....	52
5.2.2	Dispersión angular b).....	54
5.2.2.1	M=N=3.....	54
5.2.2.1.1	CDIT.....	54
5.2.2.1.2	CSIT.....	55
5.2.2.1.3	Sin información del canal en el transmisor.....	56
5.2.2.2	M=N=4.....	58
5.2.2.2.1	CDIT.....	58
5.2.2.2.2	CSIT.....	59
5.2.2.2.3	Sin información del canal en el transmisor.....	60
5.2.2.3	M=N=6.....	62
5.2.2.3.1	CDIT.....	62
5.2.2.3.2	CSIT.....	63
5.2.2.3.3	Sin información del canal en el transmisor.....	64
5.2.3	Dispersión angular c).....	66
5.2.3.1	M=N=3.....	66
5.2.3.1.1	CDIT.....	66
5.2.3.1.2	CSIT.....	67
5.2.3.1.3	Sin información del canal en el transmisor.....	68
5.2.3.2	M=N=4.....	70
5.2.3.2.1	CDIT.....	70
5.2.3.2.2	CSIT.....	71
5.2.3.2.3	Sin información del canal en el transmisor.....	72
5.2.3.3	M=N=6.....	74
5.2.3.3.1	CDIT.....	74
5.2.3.3.2	CSIT.....	75

5.2.3.3.3 Sin información del canal en el transmisor.....	76
5.2.4 Dispersión angular d).....	78
5.2.4.1 $M=N=3$	78
5.2.4.1.1 CDIT.....	78
5.2.4.1.2 CSIT.....	79
5.2.4.1.3 Sin información del canal en el transmisor.....	80
5.2.4.2 $M=N=4$	82
5.2.4.2.1 CDIT.....	82
5.2.4.2.2 CSIT.....	83
5.2.4.2.3 Sin información del canal en el transmisor.....	84
5.2.4.3 $M=N=6$	86
5.2.4.3.1 CDIT.....	86
5.2.4.3.2 CSIT.....	87
5.2.4.3.3 Sin información del canal en el transmisor.....	88
5.2.5 Dispersión angular e).....	90
5.2.5.1 $M=N=3$	90
5.2.5.1.1 CDIT.....	90
5.2.5.1.2 CSIT.....	91
5.2.5.1.3 Sin información del canal en el transmisor.....	92
5.2.5.2 $M=N=4$	94
5.2.5.2.1 CDIT.....	94
5.2.5.2.2 CSIT.....	95
5.2.5.2.3 Sin información del canal en el transmisor.....	96
5.2.5.3 $M=N=6$	98
5.2.5.3.1 CDIT.....	98
5.2.5.3.2 CSIT.....	99
5.2.5.3.3 Sin información del canal en el transmisor.....	100
5.2.6 Dispersión angular f).....	102
5.2.6.1 $M=N=3$	102
5.2.6.1.1 CDIT.....	102
5.2.6.1.2 CSIT.....	103
5.2.6.1.3 Sin información del canal en el transmisor.....	104
5.2.6.2 $M=N=4$	106
5.2.6.2.1 CDIT.....	106
5.2.6.2.2 CSIT.....	107
5.2.6.2.3 Sin información del canal en el transmisor.....	108
5.2.6.3 $M=N=6$	110
5.2.6.3.1 CDIT.....	110
5.2.6.3.2 CSIT.....	111
5.2.6.3.3 Sin información del canal en el transmisor.....	112
6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	114
6.1 Conclusiones.....	114
6.2 Líneas futuras.....	115
7. PRESUPUESTO	116
8. BIBLIOGRAFÍA	118

Índice de figuras

Figura 1. Esquema de sistema MIMO.....	20
Figura 2. Espectro de ondas milimétricas [5].....	27
Figura 3. Atenuación en la banda de ondas milimétricas [13].....	28
Figura 4. Pérdidas por follaje en función de la frecuencia [5].....	28
Figura 5. Pérdidas por atenuación por lluvia en función de la frecuencia [5].....	29
Figura 6. Método “water-filling” [7].....	33
Figura 7. Dispersiones angulares del modelo del sistema [12].....	40
Figura 8. Capacidad CDIT para dispersión angular a) con $M=N=3$	42
Figura 9. Capacidad CSIT para dispersión angular a) con $M=N=3$	43
Figura 10. Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular a) con $M=N=3$	44
Figura 11. Capacidad CDIT para dispersión angular a) con $M=N=4$	46
Figura 12. Capacidad CSIT para dispersión angular a) con $M=N=4$	47
Figura 13. Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular a) con $M=N=4$	48
Figura 14. Capacidad CDIT para dispersión angular a) con $M=N=6$	50
Figura 15. Capacidad CSIT para dispersión angular a) con $M=N=6$	51
Figura 16. Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular a) con $M=N=6$	52
Figura 17. Capacidad CDIT para dispersión angular b) con $M=N=3$	54
Figura 18. Capacidad CSIT para dispersión angular b) con $M=N=3$	55
Figura 19. Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular b) con $M=N=3$	56
Figura 20. Capacidad CDIT para dispersión angular b) con $M=N=4$	58
Figura 21. Capacidad CSIT para dispersión angular b) con $M=N=4$	59
Figura 22. Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular b) con $M=N=4$	60
Figura 23. Capacidad CDIT para dispersión angular b) con $M=N=6$	62

Figura 24. Capacidad CSIT para dispersión angular b) con $M=N=6$	63
Figura 25. Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular b) con $M=N=6$	64
Figura 26. Capacidad CDIT para dispersión angular c) con $M=N=3$	66
Figura 27. Capacidad CSIT para dispersión angular c) con $M=N=3$	67
Figura 28. Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular c) con $M=N=3$	68
Figura 29. Capacidad CDIT para dispersión angular c) con $M=N=4$	70
Figura 30. Capacidad CSIT para dispersión angular c) con $M=N=4$	71
Figura 31. Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular c) con $M=N=4$	72
Figura 32. Capacidad CDIT para dispersión angular c) con $M=N=6$	74
Figura 33. Capacidad CSIT para dispersión angular c) con $M=N=6$	75
Figura 34. Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular c) con $M=N=6$	76
Figura 35. Capacidad CDIT para dispersión angular d) con $M=N=3$	78
Figura 36. Capacidad CSIT para dispersión angular d) con $M=N=3$	79
Figura 37. Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular d) con $M=N=3$	80
Figura 38. Capacidad CDIT para dispersión angular d) con $M=N=4$	82
Figura 39. Capacidad CSIT para dispersión angular d) con $M=N=4$	83
Figura 40. Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular d) con $M=N=4$	84
Figura 41. Capacidad CDIT para dispersión angular d) con $M=N=6$	86
Figura 42. Capacidad CSIT para dispersión angular d) con $M=N=6$	87
Figura 43. Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular d) con $M=N=6$	88
Figura 44. Capacidad CDIT para dispersión angular e) con $M=N=3$	90
Figura 45. Capacidad CSIT para dispersión angular e) con $M=N=3$	91
Figura 46. Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular e) con $M=N=3$	92
Figura 47. Capacidad CDIT para dispersión angular e) con $M=N=4$	94
Figura 48. Capacidad CSIT para dispersión angular e) con $M=N=4$	95
Figura 49. Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular e) con $M=N=4$	96
Figura 50. Capacidad CDIT para dispersión angular e) con $M=N=6$	98
Figura 51. Capacidad CSIT para dispersión angular e) con $M=N=6$	99
Figura 52. Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular e) con $M=N=6$	100
Figura 53. Capacidad CDIT para dispersión angular f) con $M=N=3$	102
Figura 54. Capacidad CSIT para dispersión angular f) con $M=N=3$	103
Figura 55. Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular f) con $M=N=3$	104
Figura 56. Capacidad CDIT para dispersión angular f) con $M=N=4$	106
Figura 57. Capacidad CSIT para dispersión angular f) con $M=N=4$	107
Figura 58. Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular f) con $M=N=4$	108
Figura 59. Capacidad CDIT para dispersión angular f) con $M=N=6$	110
Figura 60. Capacidad CSIT para dispersión angular f) con $M=N=6$	111

Figura 61. Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular f) con $M=N=6$	112
---	-----

Índice de tablas

Tabla 1. Autovalores de la matriz H para dispersión angular a) con $M=N=3$	42
Tabla 2. Valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular a) con $M=N=3$	43
Tabla 3. Valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular a) con $M=N=3$	44
Tabla 4. Valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular a) con $M=N=3$	45
Tabla 5. Autovalores de la matriz H para dispersión angular a) con $M=N=4$	46
Tabla 6. Valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular a) con $M=N=4$	47
Tabla 7. Valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular a) con $M=N=4$	48
Tabla 8. Valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular a) con $M=N=4$	49
Tabla 9. Autovalores de la matriz H para dispersión angular a) con $M=N=6$	50
Tabla 10. Valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular a) con $M=N=6$	51
Tabla 11. Valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular a) con $M=N=6$	52
Tabla 12. Valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular a) con $M=N=6$	53
Tabla 13. Autovalores de la matriz H para dispersión angular b) con $M=N=3$	54
Tabla 14. Valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular b) con $M=N=3$	55
Tabla 15. Valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular b) con $M=N=3$	56
Tabla 16. Valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular b) con $M=N=3$	57
Tabla 17. Autovalores de la matriz H para dispersión angular b) con $M=N=4$	58

Tabla 18. Valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular b) con $M=N=4$	59
Tabla 19. Valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular b) con $M=N=4$	60
Tabla 20. Valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular b) con $M=N=4$	61
Tabla 21. Autovalores de la matriz H para dispersión angular b) con $M=N=6$	62
Tabla 22. Valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular b) con $M=N=6$	63
Tabla 23. Valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular b) con $M=N=6$	64
Tabla 24. Valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular b) con $M=N=6$	65
Tabla 25. Autovalores de la matriz H para dispersión angular c) con $M=N=3$	66
Tabla 26. Valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular c) con $M=N=3$	67
Tabla 27. Valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular c) con $M=N=3$	68
Tabla 28. Valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular c) con $M=N=3$	69
Tabla 29. Autovalores de la matriz H para dispersión angular c) con $M=N=4$	70
Tabla 30. Valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular c) con $M=N=4$	71
Tabla 31. Valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular c) con $M=N=4$	72
Tabla 32. Valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular c) con $M=N=4$	73
Tabla 33. Autovalores de la matriz H para dispersión angular c) con $M=N=6$	74
Tabla 34. Valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular c) con $M=N=6$	75
Tabla 35. Valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular c) con $M=N=6$	76
Tabla 36. Valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular c) con $M=N=6$	77
Tabla 37. Autovalores de la matriz H para dispersión angular d) con $M=N=3$	78
Tabla 38. Valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular d) con $M=N=3$	79
Tabla 39. Valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular d) con $M=N=3$	80
Tabla 40. Valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular d) con $M=N=3$	81
Tabla 41. Autovalores de la matriz H para dispersión angular d) con $M=N=4$	82
Tabla 42. Valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular d) con $M=N=4$	83
Tabla 43. Valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular d) con $M=N=4$	84
Tabla 44. Valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular d) con $M=N=4$	85
Tabla 45. Autovalores de la matriz H para dispersión angular d) con $M=N=6$	86

Tabla 46. Valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular d) con $M=N=6$	87
Tabla 47. Valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular d) con $M=N=6$	88
Tabla 48. Valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular d) con $M=N=6$	89
Tabla 49. Autovalores de la matriz H para dispersión angular e) con $M=N=3$	90
Tabla 50. Valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular e) con $M=N=3$	91
Tabla 51. Valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular e) con $M=N=3$	92
Tabla 52. Valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular e) con $M=N=3$	93
Tabla 53. Autovalores de la matriz H para dispersión angular e) con $M=N=4$	94
Tabla 54. Valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular e) con $M=N=4$	95
Tabla 55. Valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular e) con $M=N=4$	96
Tabla 56. Valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular e) con $M=N=4$	97
Tabla 57. Autovalores de la matriz H para dispersión angular e) con $M=N=6$	98
Tabla 58. Valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular e) con $M=N=6$	99
Tabla 59. Valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular e) con $M=N=6$	100
Tabla 60. Valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular e) con $M=N=6$	101
Tabla 61. Autovalores de la matriz H para dispersión angular f) con $M=N=3$	102
Tabla 62. Valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular f) con $M=N=3$	103
Tabla 63. Valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular f) con $M=N=3$	104
Tabla 64. Valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular f) con $M=N=3$	105
Tabla 65. Autovalores de la matriz H para dispersión angular f) con $M=N=4$	106
Tabla 66. Valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular f) con $M=N=4$	107
Tabla 67. Valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular f) con $M=N=4$	108
Tabla 68. Valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular f) con $M=N=4$	109
Tabla 69. Autovalores de la matriz H para dispersión angular f) con $M=N=6$	110
Tabla 70. Valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular f) con $M=N=6$	111
Tabla 71. Valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular f) con $M=N=6$	112
Tabla 72. Valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular f) con $M=N=6$	113
Tabla 73. Desglose de horas realizadas en cada una de las fases del proyecto por el autor.....	117

Tabla 74. Desglose de horas realizadas en cada una de las fases del proyecto por el tutor/gerente.....	117
Tabla 75. Horas realizadas y coste por hora de cada una de las partes.....	117

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1 Introducción

La motivación del proyecto es el análisis de prestaciones en un sistema MIMO utilizando ondas milimétricas. Se quiere realizar dicho análisis para ver cómo se comporta el canal de un sistema MIMO para ondas milimétricas, es decir, para un rango de frecuencias de 3-300 GHz. Se quiere estudiar dicho rango de frecuencias ya que el espectro de frecuencias menores de 3 GHz está muy utilizado, casi saturado, por lo que se tendrá que utilizar en el futuro otras frecuencias, para asignar dichas frecuencias a las nuevas tecnologías que se vayan implementando, sin tener que prescindir de las demás tecnologías como consecuencia de no tener frecuencias libres. De ahí la importancia de estudiar las ondas milimétricas, ya que nos podrán abrir nuevos horizontes para nuevas tecnologías.

1.2 Objetivos

El objetivo fundamental del proyecto es el estudio de la capacidad en un sistema MIMO utilizando ondas milimétricas. En base a ese objetivo principal, se proponen los siguientes objetivos parciales:

- Realizar un estudio tanto de los sistemas MIMO como de ondas milimétricas.

- Realizar el modelo del canal que se va a querer implementar.
- Realizar distintas estrategias de transmisión para ver las diferencias entre unos y otros.
- Una vez realizados todos los objetivos anteriores, el último paso es simular en el escenario propuesto los distintos casos a analizar, para ver los resultados obtenidos y sacar las conclusiones oportunas.

1.3 Fases del desarrollo

El desarrollo del proyecto se ha dividido en 4 partes:

- Estudio: consiste en la búsqueda de información sobre los distintos componentes del proyecto.
- Desarrollo analítico: consiste en la realización del escenario y de todas las fórmulas analíticas necesarias para la implementación del proyecto.
- Implementación: consiste en simular con la herramienta MATLAB® el escenario y las fórmulas analíticas para los casos a estudio.
- Documentación: una vez realizadas todas las fases anteriores, la documentación consiste en realizar un informe con todo el proceso que se ha ido siguiendo a lo largo del proyecto, así como las simulaciones realizadas.

1.4 Medios empleados

Para la realización de las simulaciones, se ha utilizado la herramienta software MATLAB®.

1.5 Estructura de la memoria

Para facilitar la lectura de la memoria, se incluye a continuación un breve resumen de cada capítulo:

- Capítulo 1: consiste en la introducción y los objetivos a realizar del proyecto.

- Capítulo 2: trata sobre una introducción a los sistemas MIMO y sus principales características, así como la utilización del conformado de haz (“Beamforming”, BF) en sistemas MIMO.
- Capítulo 3: trata sobre una introducción a las ondas milimétricas, al espectro, a la propagación de las ondas milimétricas, etc...
- Capítulo 4: trata sobre cómo se ha modelado el sistema, es decir, al modelo del canal y a los distintos casos que se quieren realizar.
- Capítulo 5: contiene el escenario propuesto para la simulación, así como las simulaciones realizadas del mismo.
- Capítulo 6: contiene las conclusiones de las simulaciones del capítulo 5.
- Capítulo 7: habla sobre el presupuesto (coste) total del proyecto.
- Capítulo 8: contiene la bibliografía que se ha utilizado a lo largo de toda la realización del proyecto.

Capítulo 2

Sistemas MIMO

2.1 Introducción

La aparición de gran cantidad de nuevas aplicaciones de comunicación que utilizan sistemas inalámbricos que demandan crecientes tasas de transmisión, mayor calidad de servicio “QoS” (Quality of Service), etc... sobre un ancho de banda fijo, hace imprescindible la investigación de nuevas técnicas que permitan un aumento en la eficiencia espectral, lo que se traduce en un aumento de la capacidad de las redes inalámbricas que las implementan respecto a las usadas anteriormente.

Numerosos estudios en sistemas de comunicación inalámbricos han mostrados que el uso de múltiples antenas, tanto en transmisión como en recepción, ofrece la posibilidad de comunicación inalámbrica a tasas de transmisión más altas en comparación con sistemas con una única antena [1].

En este sentido las comunicaciones digitales que utilizan sistemas de entrada y salida múltiple, conocidos como sistemas MIMO (Multiple Input Multiple Output) han surgido como uno de los avances tecnológicos más significativos en las comunicaciones modernas. Estos sistemas pueden definirse de una manera simple: Dado un sistema de comunicaciones inalámbrico, consideramos un enlace para el que tanto el extremo de transmisión como el de recepción están equipados con múltiples antenas.

Una propiedad clave de los sistemas MIMO es la capacidad de explotar la propagación multitrayecto transformándola en un beneficio para el usuario. Estos

sistemas utilizan de manera efectiva el desvanecimiento aleatorio y la dispersión del retardo multitrayecto para aumentar las tasas de transferencia. El interés en los sistemas MIMO y de codificación espacio-temporal se basa en la perspectiva de una mejora de varios órdenes de magnitud en el desempeño de las comunicaciones inalámbricas sin el coste de una utilización adicional del espectro [2].

2.2 Sistemas MIMO

2.2.1 Definición de sistemas MIMO

Un sistema MIMO se define como aquel que incluye uno o varios enlaces inalámbricos en los que se usan dos o más antenas tanto en transmisión como en recepción. Para entender mejor esta definición, en la *Figura 1* se puede observar un esquema de un sistema MIMO.

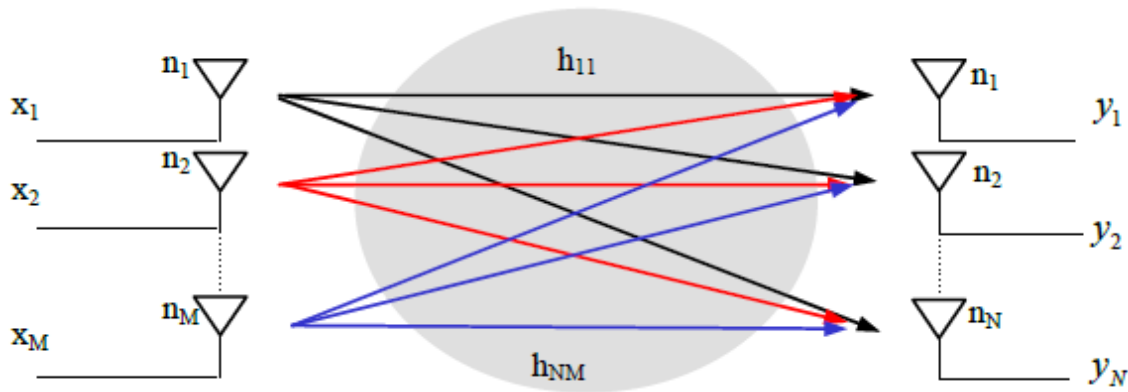


Figura 1: Esquema de sistema MIMO

2.2.2 Principio de funcionamiento

Se considerará para explicar el principio de funcionamiento de un sistema MIMO el esquema de la *Figura 1* con M antenas transmisoras y N antenas receptoras. La información que se desea transmitir ingresa al bloque del transmisor como una cadena de datos. A partir de esta, el transmisor construye varias cadena de símbolos separadas, que pueden ser independientes, parcialmente redundantes o completamente redundantes. Luego, cada cadena de símbolos se mapea en una antena de transmisión distinta. Este mapeo puede incluir asignación de pesos a las antenas o precodificación espacio-temporal. El receptor captura estas señales a través de múltiples antenas y se realiza la demodulación y mapeo inverso para recuperar el mensaje transmitido. La respuesta de un sistema de antenas se representa mediante una matriz \mathbf{H} de dimensión $M \times N$. La dispersión producida por diversos objetos dará como resultado la superposición de diversas contribuciones correspondientes a la dispersión individual de

dichos objetos incidiendo desde varios ángulos y con distintos retardos. La matriz \mathbf{H} resultante mostrará, en general, desvanecimiento multitrayecto. Los distintos trayectos recorridos por la señal hasta cada uno de los receptores harán que, en general, si estos son considerados independientes, podamos suponer con una alta probabilidad que al menos uno de ellos no se encontrará en un desvanecimiento en un momento dado, lo que podrá ser utilizado para conseguir una ganancia en la relación señal a ruido (“Signal to Noise Ratio”, SNR) y, por tanto, en la eficiencia espectral. Esta ganancia, conseguida mediante el empleo de varias antenas en transmisión y recepción, es conocida como ganancia por “diversidad espacial”. En el caso de los sistemas MIMO, encontramos ganancia por diversidad tanto en transmisión como en recepción.

Es importante tener en cuenta el aumento de capacidad conseguido gracias al ancho de banda “espacial” que estos sistemas proporcionan, permitiendo la “multiplexación espacial”, cuyo principio estipula que múltiples flujos de datos independientes pueden ser enviados simultáneamente y en la misma banda de frecuencia sobre el canal MIMO y ser recuperados en el receptor, si se usa un procesamiento de señal adecuado, el llamado espacio-tiempo [2].

2.2.3 Ventajas de los sistemas MIMO

Las ventajas de los sistemas MIMO con respecto a los sistemas con una sola antena en transmisión y recepción, denominados SISO (Single Input Single Output) son las siguientes:

2.2.3.1 Ganancia por multiplexación espacial

La multiplexación espacial consiste en la transmisión de flujos de información independientes por las diferentes antenas de manera simultánea. Matemáticamente el número de subcanales equivalentes K viene dado por el número de valores singulares distintos de 0 de la matriz de canal \mathbf{H} , es decir, el rango de la matriz \mathbf{H} . La magnitud de los valores singulares elevada al cuadrado (autovalores de $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$) representa la ganancia en potencia de cada uno de los subcanales. El multiplexado de la información en K canales consigue, en teoría, aumentar la velocidad global de transmisión de datos en un factor K sin mayores requerimientos de potencia ni ancho de banda, consiguiendo una eficiencia espectral próxima a la capacidad del canal y sin necesidad de conocer el estado del canal (Channel State Information CSI) en el transmisor. En condiciones de gran dispersión, que generalmente implica correlación baja, y rango de \mathbf{H} alto, el receptor puede separar los distintos flujos de información multiplexados [3].

La máxima ganancia por multiplexación espacial de un canal MIMO $M \times N$ viene dada por $r_{\max} = \min(M, N)$.

2.2.3.2 Ganancia por diversidad

Al transmitir y recibir por varias antenas simultáneamente, se puede mejorar la fiabilidad del enlace, mitigando los desvanecimientos y disminuyendo la probabilidad de error. Si los $M \times N$ enlaces del canal MIMO sufren desvanecimientos de manera independiente y la señal transmitida se construye de una manera adecuada, el receptor

puede combinar las señales recibidas tal que la resultante compense en gran medida los desvanecimientos del canal SISO, mejorando así la SNR (relación señal a ruido) de la señal recibida.

La ganancia por diversidad en el sistema MIMO representa la mejora en la SNR, promediada en el tiempo, con respecto a la SNR del mejor canal SISO. La idea de ganancia por diversidad está unida al concepto de fiabilidad el cual se analiza mejor desde el análisis de la probabilidad de “outage” del canal (probabilidad de que la SNR se encuentre por debajo de un cierto nivel umbral que haga que el sistema no esté disponible), indicando así la calidad del rendimiento del canal garantizada con un cierto nivel de probabilidad. Por tanto, la definición de ganancia por diversidad está condicionada por el valor mínimo de referencia de la SNR.

La ganancia por diversidad se corresponde con el número de subcanales que se pueden promediar para detectar el símbolo. Por tanto, la ganancia por diversidad está limitada al grado de diversidad espacial ofrecido por el canal. En condiciones ideales, el orden de diversidad de un sistema MIMO $M \times N$ es de $M \cdot N$, luego $d_{\max} = M \cdot N$.

Obtener ganancia de diversidad en el transmisor, sin conocer el canal en el mismo, es posible codificando las señales transmitidas de una manera adecuada. Esta técnica se conoce como Codificación Espacio Temporal (STC) [3].

2.2.3.3 Ganancia de array

La ganancia de array se define como el valor medio de la potencia recibida en un sistema MIMO respecto a la potencia recibida en un sistema SISO. La ganancia de array se obtiene a través del procesamiento de las señales en el transmisor y en el receptor. Combinando coherentemente la señal en el transmisor o en el receptor se consigue un aumento de la relación señal a ruido media recibida. Dado que se “pesa” la señal recibida por cada antena, en ocasiones la ganancia en array también se conoce como ganancia por conformación de haz (beamforming). Para realizar la combinación es necesario conocer el estado instantáneo del canal (CSI) en el extremo correspondiente para obtener los pesos.

Se puede conocer el estado del canal en el receptor mediante las secuencias de entrenamiento, sin embargo conocerlo en el transmisor es más complicado ya que se requiere un canal de realimentación. En este sentido se distinguen dos tipos de sistemas para un canal MIMO $M \times N$: sin realimentación o de lazo abierto y con realimentación o de lazo cerrado. Al usar en recepción combinación por razón máxima, MRC, los sistemas de lazo cerrado aportan una ganancia en array de $10\log_{10} M \cdot N$ mientras que, en los de lazo abierto, la ganancia de array es de $10\log_{10} N$. Los de lazo cerrado serán adecuados para escenarios de baja movilidad, mientras que los de lazo abierto son más adecuados en escenarios de alta movilidad.

En recepción la ganancia por diversidad y en array están interrelacionadas. Así mientras que la ganancia por diversidad de un sistema $M \times 1$ es igual a la de un sistema $1 \times M$, este último aporta una ganancia en array de $10\log_{10} M$ [3].

2.2.3.4 Reducción de interferencia

Las interferencias en las comunicaciones móviles se deben a que múltiples usuarios comparten los recursos de tiempo y frecuencia. La reducción de la interferencia permite mejorar la cobertura en las redes móviles.

2.2.3.5 Solución de compromiso

Las tres ventajas presentadas anteriormente, es decir, diversidad espacial, multiplexación espacial y ganancia de array, no se pueden aplicar simultáneamente. Si se persigue una ganancia por diversidad alta se sacrifica parte de la ganancia por multiplexado y viceversa, siendo posible una solución de compromiso entre la ganancia por diversidad y la ganancia por multiplexado. Realizando diversas combinaciones de las ventajas de este tipo de sistemas podemos mejorar la capacidad, la cobertura y la fiabilidad [3].

2.3 Conformado de haz en Sistemas MIMO

El término “beamforming” o conformado de haz es usado para denotar una técnica de procesamiento de array. La salida proporcionada por cada elemento de la antena se pondera de acuerdo a un criterio con el fin de distinguir unas señales de interés del ruido e interferencias. El nombre de beamforming proviene de las principales formas de array de antenas que se utilizan para generar los llamados “pencil beams”, así como para recibir señales desde una dirección específica y atenuar las señales que provienen de otras direcciones. De este primer significado, relacionado con entornos de propagación caracterizados por una dispersión angular baja, el beamforming se ha extendido a escenarios ricos en “scattering” y, en la actualidad, este término se utiliza para denotar la técnica de procesamiento de antenas tanto para canales de alto rango como de bajo rango.

En entornos de bajo rango, dependiendo del nivel de sofisticación del algoritmo de procesamiento adaptado, las técnicas beamforming pueden subdividirse en dos grupos principales: beamforming fijo y beamforming adaptativo. En el primer caso, la interferencia está mitigada pero no suprimida y el sistema puede ser realizado con un coste razonable. Las antenas adaptativas, en cambio, requieren la adopción de complejos algoritmos de procesamiento de señales con el fin de dirigir el lóbulo principal hacia la dirección deseada y para suprimir las direcciones que no se desean. Este segundo enfoque conduce a un óptimo rendimiento, pero tiene un mayor coste y necesita considerables esfuerzos.

En el caso de los sistemas inalámbricos con ondas milimétricas, la función del beamforming no es solo considerar el patrón de radiación de la antena, centrándose en maximizar la SNR recibida en condiciones de una red inalámbrica dinámica. El

correspondiente transmisor y receptor pueden, por tanto, tener patrones de radiación poco convencionales [4].

Capítulo 3

Ondas milimétricas

3.1 Introducción

Las comunicaciones móviles han sido una de las innovaciones tecnológicas más exitosas en la historia moderna. La combinación de los avances tecnológicos y las atractivas propuestas de valor que tienen las comunicaciones móviles han hecho que las mismas sean parte de la vida de 5.000 millones de personas. Debido al aumento de popularidad de los “Smartphone” y otros dispositivos de datos móviles como los “netbooks” y los “ebooks”, el tráfico de datos móviles está experimentando un crecimiento sin precedentes. Algunas predicciones indican que los datos móviles crecerán un 108% anualmente durante esta década. Con el fin de cumplir con este crecimiento exponencial, mejoras en la capacidad de la interfaz aire y la asignación de nuevo espectro son de vital importancia.

Los actuales sistemas de cuarta generación (4G) incluyendo LTE y Mobile WiMAX ya utilizan tecnologías avanzadas como pueden ser Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM), MIMO, diversidad multiusuario, adaptación del enlace, turbocódigos y Hibryd Automatic Repeat Request (HARQ), con el fin de lograr eficiencias espectrales cerca de los límites teóricos.

Como la demanda de datos móviles crece, el espectro de frecuencias menores de 3 GHz está cada vez más poblado. Por otro lado, una gran cantidad del espectro entre 3 y 300 GHz está sin utilizar. El espectro de frecuencia comprendido entre 3 y 30 GHz es generalmente conocido como Super High Frequency (SHF) mientras que, el espectro

comprendido entre 30 y 300 GHz es conocido como Extremely High Frequency (EHF) o banda de ondas milimétricas. Dado que las ondas de radio en las bandas SHF y EHF comparten características similares de propagación, nos referimos al espectro comprendido entre 3 y 300 GHz colectivamente como banda de ondas milimétricas con longitudes de onda comprendidas entre 1 y 100 mm.

Los sistemas de comunicaciones móviles que utilizan ondas milimétricas pueden alcanzar velocidades de datos multigigabit a una distancia de hasta unos pocos kilómetros ya existentes para comunicaciones punto a punto. Sin embargo, los componentes electrónicos utilizados en estos sistemas, son demasiado grandes y consumen demasiada potencia para poder ser aplicable en la comunicación móvil. La disponibilidad de la banda de 60 GHz del espectro sin licencia ha estimulado el interés en las comunicaciones inalámbricas de corto alcance con tasas de Gbps [5].

3.2 Espectro de ondas milimétricas

Casi todas las comunicaciones de radio comerciales incluyendo radio AM/FM, TV de alta definición, comunicaciones por satélite, dispositivos móviles, GPS y Wi-Fi están contenidas en el espectro comprendido entre 300 MHz y 3 GHz. Esta banda es referida generalmente como el punto dulce debido a sus características de propagación para aplicaciones inalámbricas comerciales. La porción del espectro de RF superior a 3 GHz, sin embargo, no ha sido explotada para aplicaciones inalámbricas comerciales. Recientemente ha existido un cierto interés en la exploración de dicho espectro para comunicaciones inalámbricas fijas y de corto alcance. Por ejemplo, el rango de frecuencias comprendidas entre 3.1 y 10.6 GHz ha sido propuesto para permitir conectividad en áreas personales con una alta velocidad de datos. El uso de la banda de absorción de oxígeno comprendida entre 57 y 64 GHz también se está promoviendo para proporcionar tarifas de datos multigigabit para conectividad de corto alcance y redes inalámbricas de área local. Adicionalmente, Local Multipoint Distribution Service (LMDS) operando en frecuencias comprendidas entre 28 y 30 GHz fue concebida como una banda ancha fija inalámbrica, siendo una tecnología punto-multipunto para la utilización en la denominada “última milla”.

Dentro del espectro comprendido entre 3 y 300 GHz, hasta 252 GHz de ancho de banda pueden ser potencialmente usados para comunicaciones móviles de banda ancha. Las frecuencias comprendidas entre 57 y 64 GHz, siendo denominada esta banda como banda de absorción de oxígeno, pueden experimentar atenuaciones de aproximadamente 15 dB/Km. En la llamada banda de absorción de vapor de agua, dicha tasa de absorción (H_2O) depende de la cantidad del vapor de agua y puede ser de decenas de dB en el rango de frecuencias comprendido entre 164 y 200 GHz. Con una suposición razonable de que un 40% del espectro puede estar disponible, la Millimeter-Wave Mobile Broadband (MMB) abre la puerta para un nuevo espectro de 100 GHz para las comunicaciones móviles, lo que significa que se tendría más de 200 veces el espectro asignado actualmente para este fin para las frecuencias por debajo de 3 GHz [5].

En la *Figura 2* se puede observar de una forma más detallada el espectro de frecuencias comprendido entre 3 y 300 GHz.

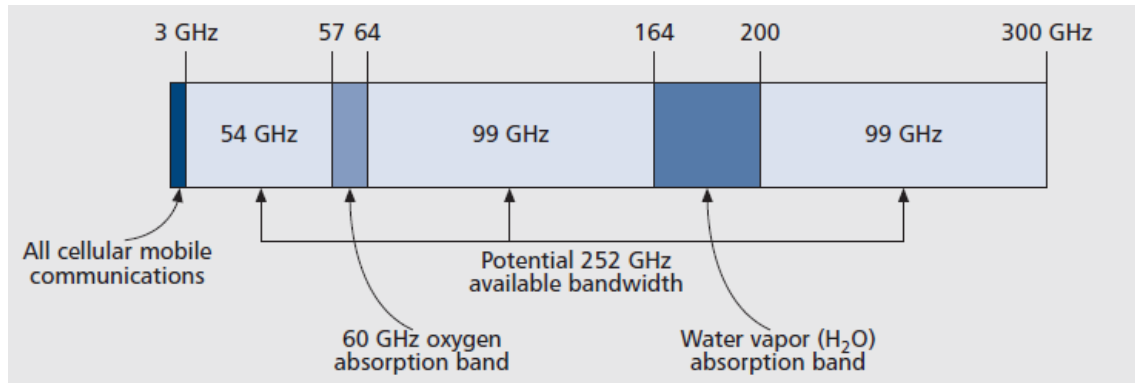


Figura 2: Espectro de ondas milimétricas [5]

3.3 Propagación en ondas milimétricas

3.3.1 Propagación en espacio libre

Las pérdidas de transmisión de ondas milimétricas son principalmente las pérdidas en espacio libre. Un general malentendido es que las pérdidas de propagación en espacio libre dependen de la frecuencia, por lo que las frecuencias más altas se propagan de una peor manera que las frecuencias bajas. La razón de este concepto erróneo viene en que, a menudo, se utiliza la suposición en los libros de texto de que la pérdida por distancia se calcula a una frecuencia específica entre dos antenas isotrópicas, cuya área de apertura efectiva aumenta con la longitud de onda (disminuye con la frecuencia de la portadora). Una antena con una apertura más grande tiene una ganancia mayor que una más pequeña ya que captura más energía. Sin embargo, con longitudes de onda más pequeñas, más antenas pueden ser utilizadas en una misma zona. Para las mismas áreas de apertura de antenas, las longitudes de onda más pequeñas (frecuencias altas) no deberían tener ninguna desventaja con respecto a longitudes de onda más grandes (frecuencias bajas) en términos de pérdidas en espacio libre. Además, un gran número de antenas puede permitir que el transmisor y el receptor tengan grandes ganancias. Por ejemplo, a una frecuencia de 80 GHz, se tendrán 30 dB más de ganancia que para una frecuencia de 2.4 GHz si el área de la antena se mantiene constante [5].

3.3.2 Penetración y otras pérdidas

Para la banda de frecuencias comprendidas entre 3 y 300 GHz, las pérdidas atmosféricas y la atenuación por lluvia son típicamente de unos pocos dB/Km, excluyendo las bandas de absorción de agua y de oxígeno, como puede observarse en la *Figura 3*.

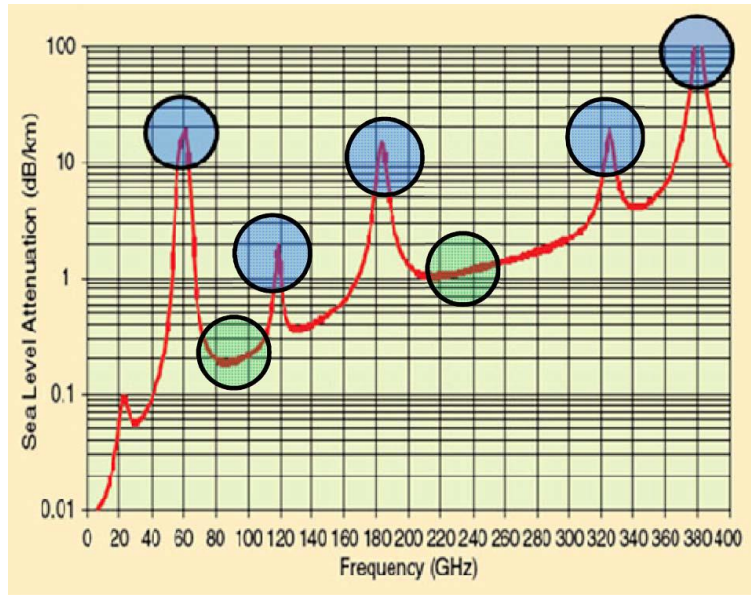


Figura 3: Atenuación en la banda de ondas milimétricas [13]

Puede verse como para las bandas de absorción de oxígeno (57-64 GHz) y de agua (164-200 GHz) las pérdidas son del orden de 15-20 dB/Km, por lo que estas bandas se utilizarán para aplicaciones de corto alcance.

Las pérdidas debido a la reflexión y la difracción dependen en gran medida, del material y de la superficie. Aunque la reflexión y la difracción reducen el alcance para ondas milimétricas, facilitan las comunicaciones sin línea de visión directa. Mientras que las señales a frecuencias más bajas pueden penetrar de una manera más fácil los edificios, las señales de ondas milimétricas no penetran materiales sólidos de una manera tan sencilla.

Las pérdidas de follaje en ondas milimétricas son significativas y pueden ser un impedimento que puede limitar la propagación en algunos casos. En la Figura 4 puede observarse como varían las pérdidas por follaje a medida que aumenta la frecuencia.

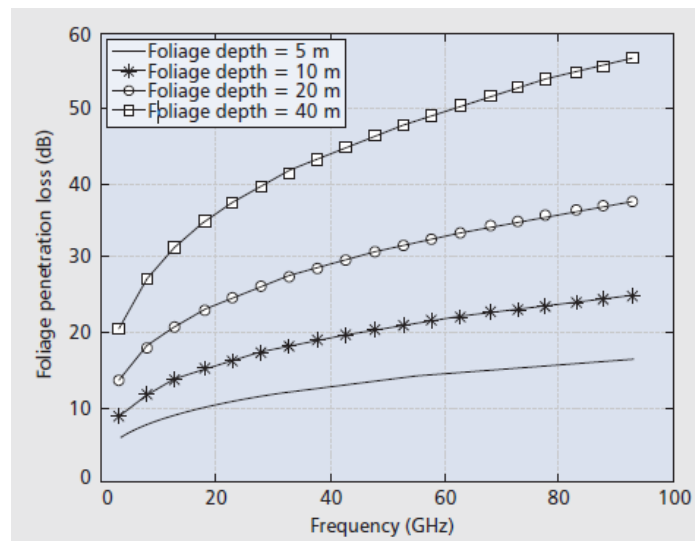


Figura 4: Pérdidas por follaje en función de la frecuencia [5]

Como se observa, se pueden llegar a tener unas pérdidas por follaje de hasta casi 60 dB, lo cual puede ser un gran impedimento.

Las transmisiones en ondas milimétricas pueden experimentar atenuaciones significativas en la presencia de una gran lluvia. Las gotas de lluvia son más o menos del mismo tamaño que las longitudes de onda (mm) y por lo tanto pueden causar la dispersión de la señal. La atenuación en dB/Km puede calcularse a partir de las tasas de lluvia (mm/h). Un ejemplo de cómo varía la atenuación por lluvia a medida que aumenta la frecuencia para distintas tasas de lluvia puede observarse en la *Figura 5*.

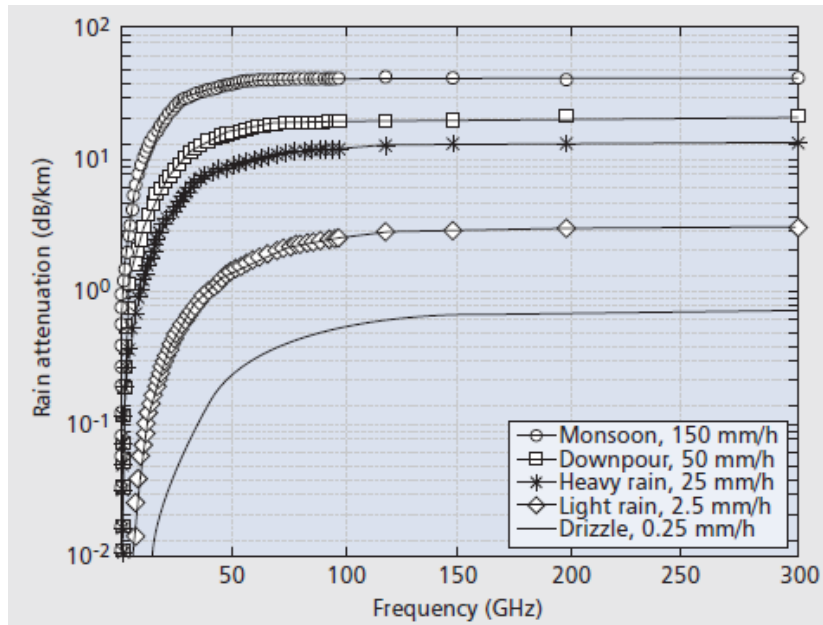


Figura 5: Pérdidas por atenuación por lluvia en función de la frecuencia [5]

Como se observa, se puede llegar a tener una atenuación por lluvia, para una tasa de lluvia de 150 mm/h de aproximadamente 50 dB/Km para frecuencias superiores a 50 GHz. Afortunadamente, la lluvia más intensa tiende a caer en ciertos lugares, siendo grandes cantidades de lluvia en poco tiempo [5].

3.3.3 Doppler y multitrayecto

El Doppler de un canal inalámbrico depende de la frecuencia de la portadora y la movilidad. Suponiendo un entorno rico en dispersión y antenas omnidireccionales, el máximo desplazamiento para una frecuencia de portadora en el rango de 3 a 60 GHz con una movilidad de 3 a 350 Km/h va desde 10 Hz a 20 KHz. El desplazamiento de los valores Doppler para ondas entrantes en el receptor con diferentes ángulos, resulta en un fenómeno llamado dispersión Doppler: en el caso de MMB (Millimeter-Wave Mobile Broadband), los haces estrechos en el transmisor y el receptor disminuirá la dispersión Doppler. Diversos estudios demuestran que el valor RMS (Root Mean Square) del perfil de retardo de potencia (PDP) con ondas milimétricas en un entorno urbano es de aproximadamente 1-10 ns, siendo así el ancho de banda de coherencia aproximadamente en el rango 10-100 MHz [5].

Capítulo 4

Modelo del sistema

4.1 Introducción

En este capítulo, vamos a realizar lo que se conoce como modelado del sistema siendo, en nuestro caso, de la siguiente forma.

En primer lugar, realizaremos un modelo de canal, es decir, modelar lo que se conoce como matriz \mathbf{H} de canal. Una vez realizado dicho modelo de canal, pasaremos a hallar la matriz de covarianza de entrada que define la estrategia de transmisión para cada una de las tres posibilidades que hemos propuesto, las cuales son las siguientes:

- Cuando el transmisor tiene un total conocimiento del canal, llamado CSIT (Channel State Information at the Transmitter).
- Cuando el transmisor no tiene un total conocimiento del canal, sino que solo conocemos la distribución estadística del canal, llamado CDIT (Channel Distribution Information at the Transmitter).
- Cuando no tenemos información acerca del canal.

Una vez hallada la matriz de covarianza de entrada, uniendo dicha matriz a la matriz de canal que hallamos anteriormente (\mathbf{H}), pasaremos finalmente a hallar la capacidad para cada una de las tres posibilidades anteriores.

4.2 Modelo de canal

4.2.1 Matriz de canal

El canal MIMO se describe mediante una matriz de canal, llamada matriz \mathbf{H} , con elementos h_{nm} que definen el desvanecimiento del canal de la antena de transmisión en la estación base (BS) m , a la n -ésima antena en recepción. El número total de elementos transmisores y receptores es M y N respectivamente. Se asume que partimos de un canal estacionario, con desvanecimiento plano y correlación espacial.

Muestreando el vector de la onda espacial en el transmisor y el receptor, en un conjunto finito de ondas planas saliendo desde direcciones $\{k_1, k_2, \dots, k_L\}$ y $\{k'_1, k'_2, \dots, k'_L\}$ respectivamente, la matriz de canal \mathbf{H} puede ser descrita como en la ecuación (1).

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} e^{jk'_1 r'_1} & e^{jk'_2 r'_1} & \dots & e^{jk'_L r'_1} \\ e^{jk'_1 r'_2} & e^{jk'_2 r'_2} & \dots & e^{jk'_L r'_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e^{jk'_1 r'_N} & e^{jk'_2 r'_N} & \dots & e^{jk'_L r'_N} \end{bmatrix} \chi \begin{bmatrix} S(k'_1, k_1) & S(k'_1, k_2) & \dots & S(k'_1, k_L) \\ S(k'_2, k_1) & S(k'_2, k_2) & \dots & S(k'_2, k_L) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S(k'_L, k_1) & S(k'_L, k_2) & \dots & S(k'_L, k_L) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\chi \begin{bmatrix} e^{-jk_1 r_1} & e^{-jk_1 r_2} & \dots & e^{-jk_1 r_M} \\ e^{-jk_2 r_1} & e^{-jk_2 r_2} & \dots & e^{-jk_2 r_M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e^{-jk_L r_1} & e^{-jk_L r_2} & \dots & e^{-jk_L r_M} \end{bmatrix} = \mathbf{B}_N^H \mathbf{S} \mathbf{B}_M$$

En la ecuación (1) r'_n y r_m son la posición del n -ésimo elemento receptor y el m -ésimo elemento transmisor respectivamente. $S(k', k)$ se refiere a la función de scattering del canal, que se refiere a la onda plana emitida desde la dirección k que incide en el receptor con dirección k' . \mathbf{B}_N y \mathbf{B}_M son matrices rectangulares deterministas que dependen de la geometría de la antena y \mathbf{S} es una matriz rectangular que se modelará dependiendo de las características de scattering angulares. Asumiendo que las entradas del canal son gaussianas complejas y que las dispersiones son independientes, \mathbf{S} está completamente caracterizada por la dispersión angular de potencia conjunta (PAS). Con PAS separables, la distribución de potencia dentro de las filas está dada por el PAS en el receptor, mientras que la distribución de potencia en las columnas coincide con el PAS en el transmisor.

El canal completo puede ser simplificado mediante la siguiente ecuación:

$$\mathbf{H} = \mathbf{B}_N^H \mathbf{\Sigma}_R^{\frac{1}{2}} \mathbf{G} \mathbf{\Sigma}_T^{\frac{1}{2}} \mathbf{B}_M \quad (2)$$

Donde \mathbf{G} es una matriz gaussiana compleja aleatoria con componentes idénticamente distribuidas i.i.d. y varianza unidad. $\mathbf{\Sigma}_R$ y $\mathbf{\Sigma}_T$ son matrices diagonales deterministas cuya diagonal principal está configurada con el PAS correspondiente. Estas matrices están normalizadas a 1.

Cualquier aplicación de este modelo de canal implica un determinado muestreo de la onda espacial definida por el vector k . Solo se va a considerar el ángulo azimutal.

Este es un punto de partida razonable teniendo en cuenta que el ángulo de elevación es mucho menor que el ángulo azimutal para antenas suficientemente grandes [6].

4.2.2 Correlación de canal

Dada la suposición de PAS separable, la correlación espacial entre los elementos h_{ij} y h_{kl} de \mathbf{H} , conduce a correlaciones espaciales separables, siendo dicha correlación en el transmisor y en el receptor $\boldsymbol{\theta}_T$ y $\boldsymbol{\theta}_R$ respectivamente. Dichas correlaciones pueden observarse en las ecuaciones (3) y (4).

$$\boldsymbol{\theta}_R = \frac{1}{M} E\{\mathbf{H}\mathbf{H}^H\} = \mathbf{B}_N^H \boldsymbol{\Sigma}_R \mathbf{B}_N \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\theta}_T = \frac{1}{N} E\{\mathbf{H}^H \mathbf{H}\} = \mathbf{B}_M^H \boldsymbol{\Sigma}_T \mathbf{B}_M \quad (4)$$

Cabe destacar que bajo el modelo de canal asumido, una formulación cerrada para la correlación espacial es posible. El beneficio es que, de esta manera, las matrices de correlación se pueden construir de una manera sencilla, dependiendo exclusivamente de medidas fáciles y parámetros configurables, como son la geometría de la antena y la dispersión angular [6].

4.2.3 Matriz de covarianza de entrada del canal

La matriz de covarianza de la señal que se transmite por el canal es uno de los elementos más importantes, junto con la matriz \mathbf{H} de canal, para la obtención de la capacidad. Vamos a denotar a dicha matriz de covarianza como la matriz \mathbf{Q} . A continuación vamos a comentar como llegar a obtener la matriz de covarianza \mathbf{Q} para las tres estrategias de transmisión comentadas anteriormente, siendo las mismas cuando tenemos un total conocimiento del canal por parte del transmisor (CSIT), cuando tenemos un conocimiento de la distribución estadística del canal (CDIT) y cuando el canal es desconocido en el transmisor, es decir, no tenemos información del mismo.

4.2.3.1 Channel State Information at the Transmitter (CSIT)

Cuando tenemos un total conocimiento del canal por parte del transmisor, la matriz de covarianza \mathbf{Q} , de dimensiones $M \times M$, vendrá dada por la siguiente ecuación.

$$\mathbf{Q} = \mathbf{V} \mathbf{P} \mathbf{V}^H \quad (5)$$

Donde \mathbf{V} (autovectores de \mathbf{Q}) viene dada por la descomposición en valores singulares de la matriz de canal \mathbf{H} [7], definiéndose la descomposición de valores singular de una matriz, en este caso de la matriz \mathbf{H} , a partir de la ecuación (6).

$$\mathbf{H} = \mathbf{U} \boldsymbol{\Sigma} \mathbf{V}^H \quad (6)$$

Donde \mathbf{U} es una matriz de dimensiones $N \times N$, $\mathbf{\Sigma}$ es una matriz de dimensiones $N \times M$ y \mathbf{V} es una matriz de dimensiones $M \times M$ [8], que es la que queremos encontrar a partir de la descomposición en valores singulares de la matriz \mathbf{H} . La matriz $\mathbf{\Sigma}$ es una matriz diagonal, cuyos elementos fuera de la diagonal son 0, y los que componen la diagonal son los valores singulares de \mathbf{H} , siendo los mismos mayores de 0 y en orden descendente. El número de valores singulares de la matriz \mathbf{H} es el denominado rango de \mathbf{H} [9].

La matriz \mathbf{V} , por tanto, contendrá los autovalores de la matriz de correlación en el transmisor. Para tener completamente caracterizada la matriz de covarianza de la señal de entrada cuando se tiene un total conocimiento del canal en el transmisor, nos queda hallar la matriz de potencia \mathbf{P} (autovalores de \mathbf{Q}). En este caso, la potencia se transmitirá de manera óptima, resultando de dicha optimización que la matriz de potencia \mathbf{P} se calcule a través del método conocido como “water-filling”, [9].

El funcionamiento de dicho método puede observarse en la *Figura 6*.

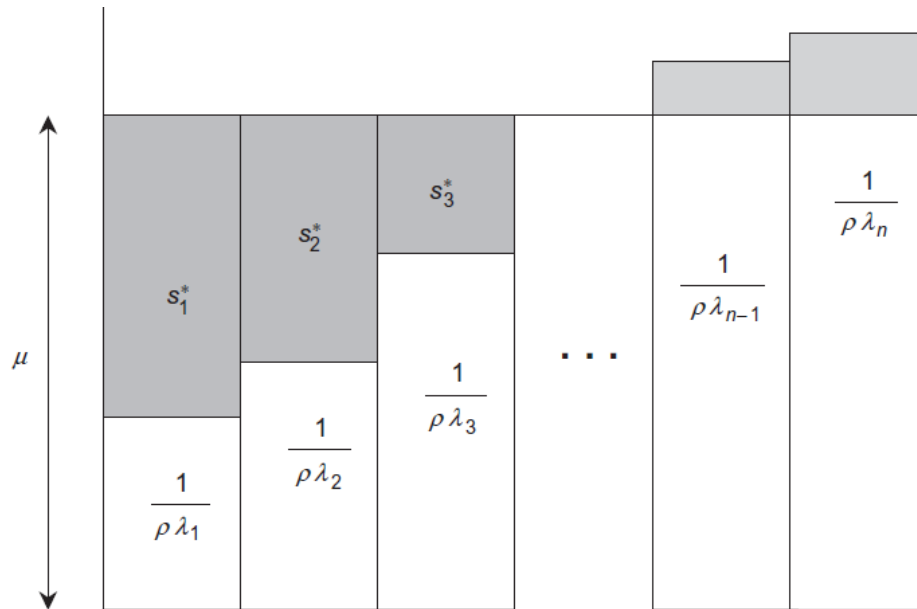


Figura 6: Método “water-filling” [7]

Como se puede observar, la potencia se reparte de manera óptima entre todas las antenas, definiendo en nuestro caso el método “water-filling” de tal manera que la suma de todos los valores de potencia repartidos óptimamente sea el número de antenas transmisoras.

Como más adelante tendremos que comparar la capacidad con la hallada con BF, también deberemos hallar la matriz de potencia \mathbf{P} para el caso en el que utilicemos BF, siendo dicha matriz de las mismas dimensiones que la matriz \mathbf{P} calculada mediante el método de “water-filling” pero, en este caso, en vez de distribuir la potencia de manera óptima en varios modos, en el caso de BF distribuiremos la potencia en un solo modo, siendo la potencia de ese modo el número de antenas transmisoras.

4.2.3.2 Channel Distribution Information at the Transmitter (CDIT)

En el caso en el que no conocemos totalmente el canal en el transmisor, sino que solo conocemos la distribución estadística del mismo, la matriz de covarianza no cambiará y vendrá dada por la misma ecuación que en el caso de CSIT, es decir, por la ecuación (5).

La matriz \mathbf{V} se hallara de forma similar al caso de CSIT, es decir, mediante la descomposición en valores singulares de la matriz de correlación de \mathbf{H} , $\boldsymbol{\theta}_T$.

En el caso de la matriz de potencia \mathbf{P} , la cual corresponde a los autovalores de la matriz de covarianza, como ya se comentó anteriormente, se halla de forma diferente que en el caso de CSIT, ya que no podremos distribuir de una manera óptima directamente la potencia, sino que se va a tener que realizar una estimación de la misma a través de iteraciones [6]. Dicha caracterización de \mathbf{P} es válida siempre y cuando la matriz \mathbf{V} sea conocida, como es nuestro caso, ya que ha sido hallada anteriormente.

Para hallar la matriz $\mathbf{P} = \text{diag}(p_1, p_2, \dots, p_M)$ se seguirá el siguiente algoritmo:

- Lo primero de todo será definir una versión rotada del canal, siendo la misma la que aparece en la ecuación (7). La j -ésima columna de $\hat{\mathbf{H}}$ se denotará como \hat{h}_j .

$$\hat{\mathbf{H}} = \mathbf{H}\mathbf{V} \quad (7)$$

- Una vez definida la versión rotada del canal, la matriz \mathbf{P} debe satisfacer las condiciones suficientes y necesarias que aparecen en la ecuación (8).

$$\frac{1}{N} E \left[\text{Tr} \left\{ \left(\mathbf{I} + \text{SNR} \hat{h}_j \hat{h}_j^H \right) \left(\mathbf{I} + \frac{\text{SNR}}{M} \hat{\mathbf{H}} \mathbf{P} \hat{\mathbf{H}}^H \right)^{-1} \right\} \right] \begin{cases} = 1 & \text{if } p_j > 0 \\ \leq 1 & \text{if } p_j = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Un único conjunto de potencias de transmisión satisface la ecuación (8). Dado que los modos no son ortogonales, no se puede hablar de “water-filling” en ningún caso, como ya se comentó anteriormente. La desigualdad que aparece en la inecuación indica que, por debajo de una cierta SNR, algunas de las potencias de transmisión pueden ser 0 [11].

- Para poder realizar el algoritmo, debemos introducir MMSE (Minimum Mean-Square Error) en la estimación lineal de la señal. Para ello se define la matriz \mathbf{B}_j , la cual se puede observar en la ecuación (9).

$$\mathbf{B}_j \triangleq \left(\mathbf{I} + \frac{\text{SNR}}{M} \hat{\mathbf{H}}_j \mathbf{P}_j \hat{\mathbf{H}}_j^H \right)^{-1} \quad (9)$$

Donde \mathbf{I} es la matriz identidad, SNR es la relación señal a ruido, M es el número de antenas transmisoras, $\widehat{\mathbf{H}}_j$ es la matriz resultante después de eliminar la columna j -ésima, mientras que \mathbf{P}_j indica la matriz diagonal obtenida de eliminar de \mathbf{P} la j -ésima fila y columna. Una vez definida la matriz \mathbf{B}_j , pasamos a definir el MMSE, cuya definición aparece en la ecuación (10).

$$MMSE_j = \frac{1}{1 + p_j \frac{SNR}{M} \widehat{\mathbf{h}}_j^H \mathbf{B}_j \widehat{\mathbf{h}}_j} \quad (10)$$

- Una vez definido el MMSE, el último paso del algoritmo de hallar la matriz \mathbf{P} , la cual se halla iterativamente a partir de la siguiente ecuación (11), inicializando para el valor 0, $\mathbf{P}^{(0)} = \mathbf{I}$.

$$\mathbf{P}_j^{(k+1)} = \frac{1 - \overline{MMSE}_j^{(k)}}{\frac{1}{M} \sum_{l=1}^M (1 - \overline{MMSE}_j^{(k)})} \quad (11)$$

Una vez hallada la matriz \mathbf{P} , solo nos falta añadir que la matriz de potencia en el caso de utilizar beamforming será la misma que para el caso de CSIT.

4.2.3.3 Canal desconocido en el transmisor

En los anteriores casos, el transmisor conocía total o parcialmente el canal. En este nuevo caso, sin embargo no conocemos absolutamente nada del canal, por lo que no se podrá optimizar la distribución de potencia o la estructura de la covarianza de entrada en las antenas. Por lo que parece intuitivo suponer que la mejor estrategia será distribuir igual potencia a todas las antenas transmisoras, resultando en una matriz de covarianza igual a la matriz identidad dividida entre el número de antenas transmisoras, por tanto, en la ecuación (12) podemos observar el resultado de dicha matriz de covarianza [10].

$$\mathbf{Q} = \frac{\mathbf{I}}{M} \quad (12)$$

4.2.4 Capacidad de canal

Una vez desarrollado el modelo del sistema, que terminó con la obtención de la matriz de covarianza de la señal de entrada al canal para cada uno de los 3 casos supuestos, el último paso antes de empezar a realizar las simulaciones es el de hallar la capacidad de canal. Antes de adentrarnos en lo que es la capacidad de canal, lo primero de todo es saber cómo se llega hasta el concepto de capacidad.

Para ello, lo primero que hay que saber es como se halla la información mutua en un canal MIMO, ya que a partir de la misma se podrá llegar a lo que queremos obtener, es decir, la capacidad del canal. La información mutua en un canal MIMO determinista viene dada por la expresión que se observa en la ecuación (13).

$$\mathfrak{I}(\mathbf{H}, \mathbf{Q}) = \log_2 \det[\mathbf{I} + \text{SNR} \cdot \mathbf{H}\mathbf{Q}\mathbf{H}^H] \quad (13)$$

Donde la matriz \mathbf{I} es la matriz identidad con dimensiones $N \times N$, SNR es la relación señal a ruido, la matriz \mathbf{H} es la matriz de canal y \mathbf{Q} es la matriz de covarianza de entrada del canal, normalizada a la unidad [7].

Una vez introducido el concepto de información mutua, ya podemos hablar de cómo hallar la capacidad, buscando solo las posibles matrices \mathbf{Q} que hacen máxima la información mutua, como puede verse en la ecuación (14).

$$\mathcal{C}(\mathbf{H}) = \max_{\mathbf{Q} \geq 0: \text{Tr}\{\mathbf{Q}\}=1} \log_2 \det[\mathbf{I} + \text{SNR} \cdot \mathbf{H}\mathbf{Q}\mathbf{H}^H] \quad (14)$$

Finalmente, una vez hallada la capacidad, solo nos falta particularizar la fórmula de la capacidad para cada uno de los tres casos a estudio, es decir, cuando se tiene una total información del canal en el transmisor (CSIT), cuando se conoce la distribución estadística del canal en el transmisor (CDIT) y cuando carecemos de información alguna acerca del canal en el transmisor.

4.2.4.1 Channel State Information at the Transmitter (CSIT)

Para cuando se tiene total información acerca del canal por parte del transmisor, sustituyendo en la ecuación (14) la matriz de covarianza de entrada \mathbf{Q} por la hallada anteriormente, obtenemos la fórmula de capacidad que se observa en la ecuación (15).

$$\mathcal{C}(\mathbf{H}) = \log_2 \det \left[\mathbf{I} + \text{SNR} \cdot \frac{\mathbf{H}\mathbf{V}\mathbf{P}\mathbf{V}^H \mathbf{H}^H}{M} \right] \quad (15)$$

Siendo la matriz de potencia \mathbf{P} la matriz hallada mediante el método de “water-filling” o la matriz hallada mediante beamforming, según sea el caso que estemos estudiando.

4.2.4.2 Channel Distribution Information at the Transmitter (CDIT)

En el caso en el que no conocemos totalmente el canal en el transmisor, sino que solo conocemos la distribución estadística del mismo, la fórmula de la capacidad del canal es similar a cuando tenemos el caso de CSIT, que aparece en la ecuación (15), siendo la diferencia la matriz de potencia \mathbf{P} que, en vez de ser la hallada mediante el método de “water-filling”, se realiza mediante el algoritmo que ya expusimos anteriormente y la matriz \mathbf{V} hallada mediante la descomposición en valores singulares de la matriz de covarianza de \mathbf{H} , $\boldsymbol{\theta}_T$.

4.2.4.3 Canal desconocido en el transmisor

En los anteriores casos, el transmisor conocía total o parcialmente el canal. En este nuevo caso, sin embargo no conocemos absolutamente nada del canal, por lo que la sustitución de la matriz de covarianza \mathbf{Q} no será la misma de los dos casos anteriores,

sino que habrá que sustituir la matriz \mathbf{Q} por la matriz de la ecuación (12), quedamos por tanto la capacidad mediante la fórmula que se observa en la ecuación (16).

$$C(\mathbf{H}) = \log_2 \det \left[\mathbf{I} + \text{SNR} \cdot \frac{\mathbf{H}\mathbf{H}^H}{M} \right] \quad (16)$$

Siendo la matriz identidad \mathbf{I} , que sale de la sustitución de la matriz de covarianza de entrada \mathbf{Q} , una matriz de dimensiones $M \times M$, no como la otra matriz identidad, cuyas dimensiones son $N \times N$.

Capítulo 5

Resultados

5.1 Escenario de simulación

Una vez realizados todos los pasos teóricos para la obtención de la capacidad del canal, ya podemos realizar las simulaciones pertinentes mediante la herramienta de simulación MATLAB®. Para realizar dichas simulaciones, lo primero de todo ha sido realizar un escenario de la simulación, el cual exponemos a continuación.

El escenario de simulación consiste en un transmisor y un receptor enfrentados, sin ningún tipo de ángulo entre ellos, es decir, el transmisor está directamente enfrentado al receptor. En el transmisor y el receptor hay un número determinado de antenas, denotadas por M y N , respectivamente, siendo la separación entre antenas para el transmisor y el receptor d_t y d_r , respectivamente. La distancia entre el transmisor y el receptor vendrá dada por D , mientras que la frecuencia de ondas milimétricas que se va a utilizar vendrá denotada como f_s . Una vez enunciados los parámetros de la simulación, pasamos a dar valor a todos y cada uno de los mismos.

- $M = N = 3, 4, 6$, simulando el escenario para cada uno de los tres casos.
- $f_s = 60$ GHz, siendo esta frecuencia una frecuencia situada en el rango de las ondas milimétricas, es decir, entre 3 y 300 GHz, correspondiendo esta frecuencia a una longitud de onda de 5 mm.

- $d_t = \lambda/2 = 2.5$ mm, siendo esta la distancia entre cada una de las antenas de transmisión.
- $d_r = \lambda/2 = 2.5$ mm, siendo esta la distancia entre cada una de las antenas de recepción.
- $D = 100$ m, es decir, el transmisor y el receptor están separados entre sí 100 metros, utilizando esta distancia ya que las dispersiones angulares son para comunicaciones inalámbricas de corto rango.
- SNR, siendo dicho valor la relación señal a ruido del sistema, variando este valor entre los valores $[-10, 10]$, para así ver cómo va evolucionando la capacidad.

Una vez explicados todos los parámetros de la simulación y sus correspondientes valores, solo nos queda saber cómo va ser la dispersión angular que va a existir en el canal, siendo este parámetro, sino el más significativo, uno de los más significativos de la simulación. La simulación se va a dividir, por así decirlo, en dos partes: en un primer lugar vamos a realizar la simulación para una dispersión angular uniforme, es decir, que se distribuye uniformemente a lo largo del espacio, tanto para cuando queremos simular el canal con la estrategia del beamforming como cuando queremos simular el canal con la potencia hallada mediante los diversos métodos anteriormente comentados en capítulos anteriores.

Una vez realizada la simulación con la dispersión angular uniforme, la siguiente parte será utilizar las dispersiones angulares que aparecen en la *Figura 7* [12], que se corresponden con las matrices $\Sigma_R^{\frac{1}{2}}$ y $\Sigma_T^{\frac{1}{2}}$. Hay que hacer notar que, tanto para cuando utilizamos la dispersión angular uniforme, como para cuando utilizamos las dispersiones angulares de la *Figura 7*, tanto el transmisor como el receptor tiene la misma dispersión angular.

Para la simulación con las dispersiones angulares de la *Figura 7*, en vez de estar los valores de la dispersión angular según aparece en dicha figura, están todos situados de tal forma que el máximo se encuentre en la posición de 0° , es decir, que son las mismas dispersiones, pero rotadas de tal forma de consigamos que el máximo se encuentre en dicha posición.

Vamos a realizar la simulación comparando los valores de la capacidad que obtenemos para los dos tipos de dispersión angular, es decir, para la dispersión angular uniforme y para las del modelo, tanto para cuando utilizamos beamforming como para cuando no lo utilizamos, es decir, en cada figura van a aparecer cuatro gráficas. Esto lo realizaremos para cada una de las dispersiones de la *Figura 7*, y dentro de cada una de las dispersiones angulares, para cada valor de M y N expuesto anteriormente cuando hablábamos de los parámetros de la simulación, para así ver cómo va evolucionando la capacidad a medida que aumentamos el número de antenas.

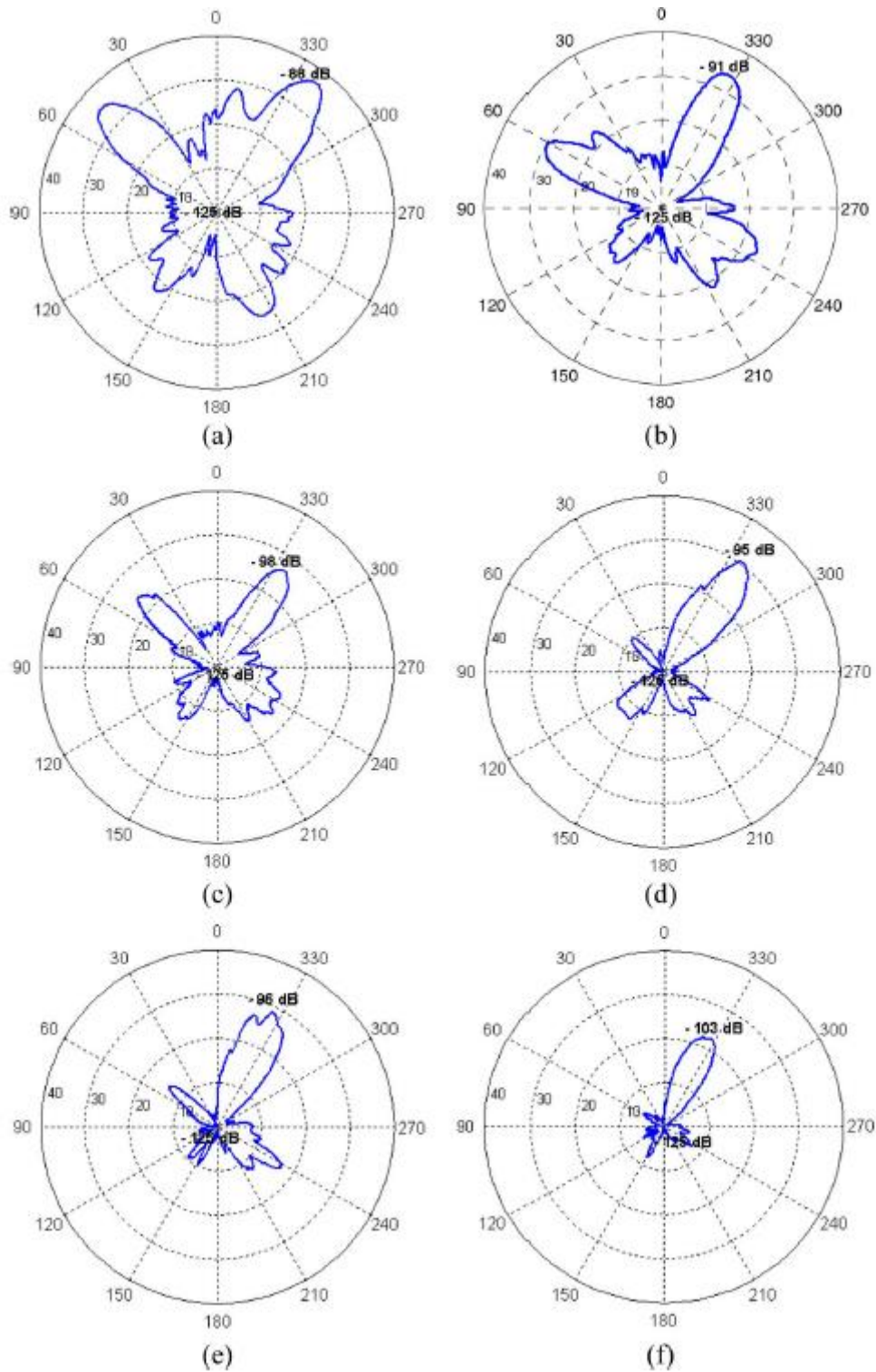


Figura 7: Dispersiones angulares del modelo del sistema [12]

5.2 Resultados

Una vez explicado el escenario en el cual van a tener lugar las simulaciones, el siguiente paso será el realizar dichas simulaciones, siguiendo los siguientes casos en cada una de las simulaciones realizadas para cada una de las dispersiones angulares de la *Figura 7*:

- En primer lugar, se realizará la descomposición en valores singulares de la matriz \mathbf{H} (svd) tanto para el caso de la matriz \mathbf{H} uniforme como para la matriz \mathbf{H} del modelo, recogiendo los autovalores en una tabla, para ver los modos del sistema. Es decir, cómo se distribuye la potencia a lo largo del canal, cuantos más modos estén activos en el canal, más dispersa va a estar la potencia.
- A continuación se representará la simulación de la capacidad para los distintos casos expuestos en anteriores capítulos, recogiendo los valores más importantes de cada gráfica en una tabla.
- Por último, realizaremos comentarios acerca de los valores obtenidos en las gráficas, comparando en los casos que sea necesarios los valores de distintas gráficas.

5.2.1 Dispersión angular a)

En este apartado, vamos a realizar las simulaciones con la dispersión angular que aparece en la *Figura 7a*), exponiéndose a continuación los resultados obtenidos.

5.2.1.1 M=N=3

En el caso de que tengamos tres antenas tanto en el transmisor como en el receptor, los autovalores de la matriz \mathbf{H} vienen reflejados en la *Tabla 1*.

\mathbf{H} uniforme	2.1374	1.0385	0.7461
\mathbf{H} modelo	2.3803	1.0465	0.2928

Tabla 1: autovalores de la matriz \mathbf{H} para dispersión angular a) con $M=N=3$

Como se observa en la *Tabla 1*, la descomposición en valores singulares de la matriz \mathbf{H} en el caso de una dispersión angular uniforme nos da como resultado que existen tres modos activos en el canal, mientras que, en el caso de la descomposición para la dispersión angular del modelo, nos encontramos con que existen dos modos de potencia dominantes, lo cual es lógico, ya que, en el caso del modelo, la dispersión angular utilizada es muy dispersa, pero no llega a ser una dispersión uniforme, por lo que se espera que existan menos modos de potencia.

5.2.1.1.1 CDIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7a*), en el caso de CDIT, se recoge en la *Figura 8*.

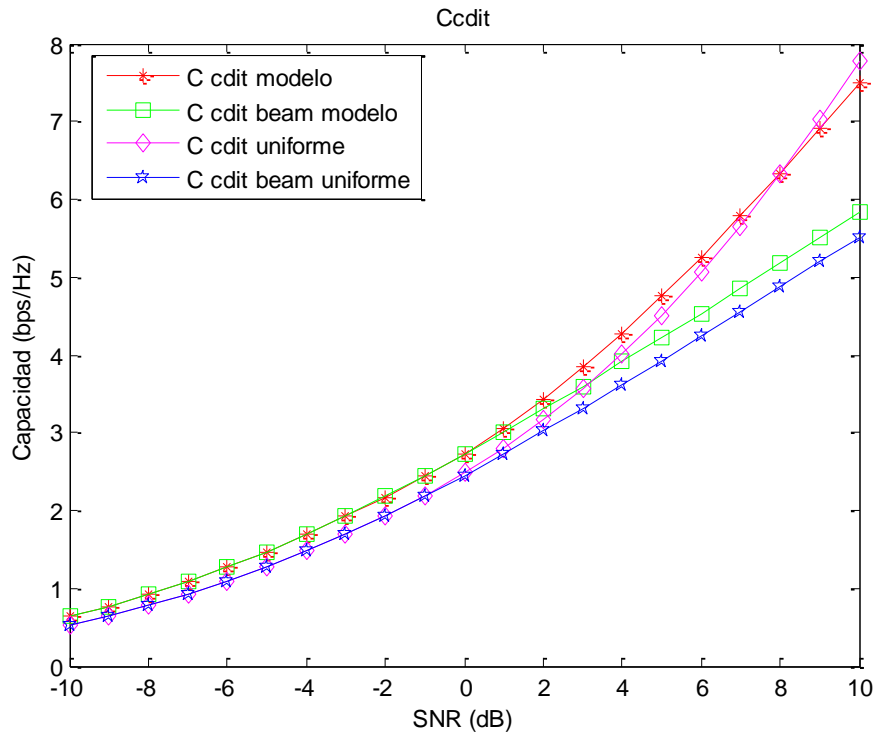


Figura 8: Capacidad CDIT para dispersión angular a) con $M=N=3$

De la *Figura 8* podemos decir que, para SNR bajas, la capacidad del modelo y la uniforme coinciden con sus respectivas utilizando BF, siendo esto debido a que la asignación de potencia óptima para SNR bajas, en este caso, coinciden en los dos casos. A medida que aumentamos la SNR, vamos observando cómo van mejorando las capacidades que no utilizan BF, como es de esperar, como consecuencia de que la dispersión angular es muy amplia, estando siempre por encima, en el caso del BF, la capacidad del modelo, ya que se tiene más correlación en el caso del modelo con respecto a la uniforme, lo que hace que, a mayor correlación, mejor sea el beamforming. En la *Tabla 2* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCDIT modelo (bps/Hz)	CCDIT BF modelo (bps/Hz)	CCDIT uniforme (bps/Hz)	CCDIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	0.6394	0.6394	0.5345	0.5345
-5	1.4665	1.4665	1.2739	1.2740
0	2.7332	2.7173	2.4801	2.4554
5	4.7497	4.2199	4.5048	3.9243
10	7.4945	5.8269	7.7769	5.5188

Tabla 2: valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular a) con $M=N=3$

5.2.1.1.2 CSIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7a*), en el caso de CSIT, se recoge en la *Figura 9*.

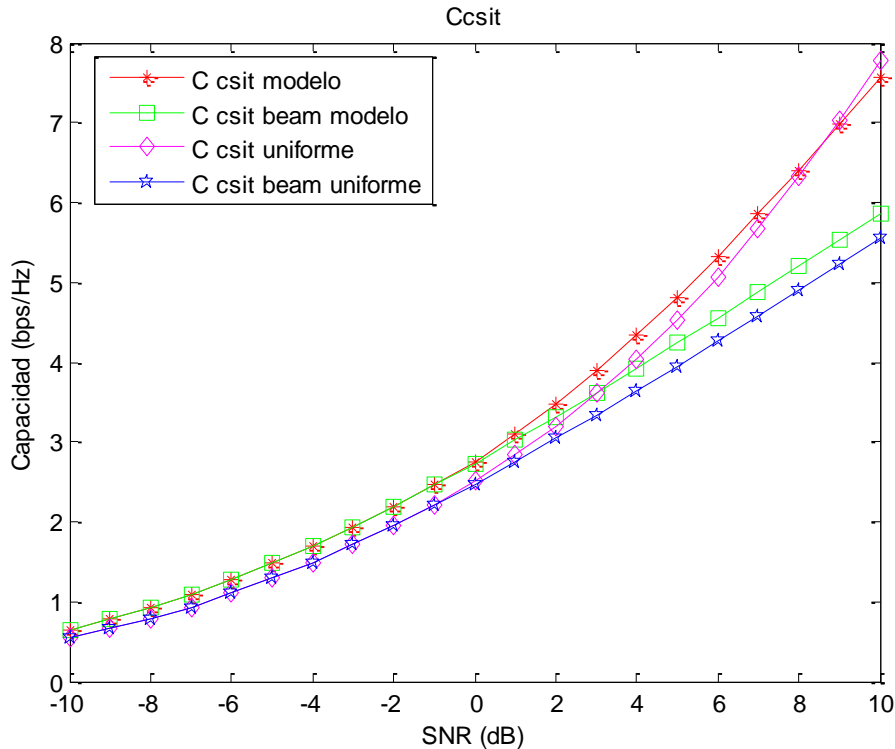


Figura 9: Capacidad CSIT para dispersión angular a) con $M=N=3$

De la *Figura 9* podemos sacar las mismas conclusiones que para el caso de CDIT, ya que las gráficas son muy parecidas, como consecuencia de que los repartos de potencia óptima en los dos casos han sido prácticamente iguales. En la *Tabla 3* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCSIT modelo (bps/Hz)	CCSIT BF modelo (bps/Hz)	CCSIT uniforme (bps/Hz)	CCSIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	0.6476	0.6476	0.5428	0.5428
-5	1.4811	1.4811	1.2896	1.2896
0	2.7599	2.7368	2.5041	2.4772
5	4.8096	4.2416	4.5304	3.9492
10	7.5757	5.8495	7.7826	5.5448

Tabla 3: valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular a) con $M=N=3$

Como se observa en la *Tabla 3*, los valores de la capacidad son ligeramente mejores que en el caso de CDIT, como consecuencia de tener un conocimiento completo del canal en el transmisor.

5.2.1.1.3 Sin información del canal en el transmisor

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7a)*, en el caso de que no tengamos información del canal, se recoge en la *Figura 10*.

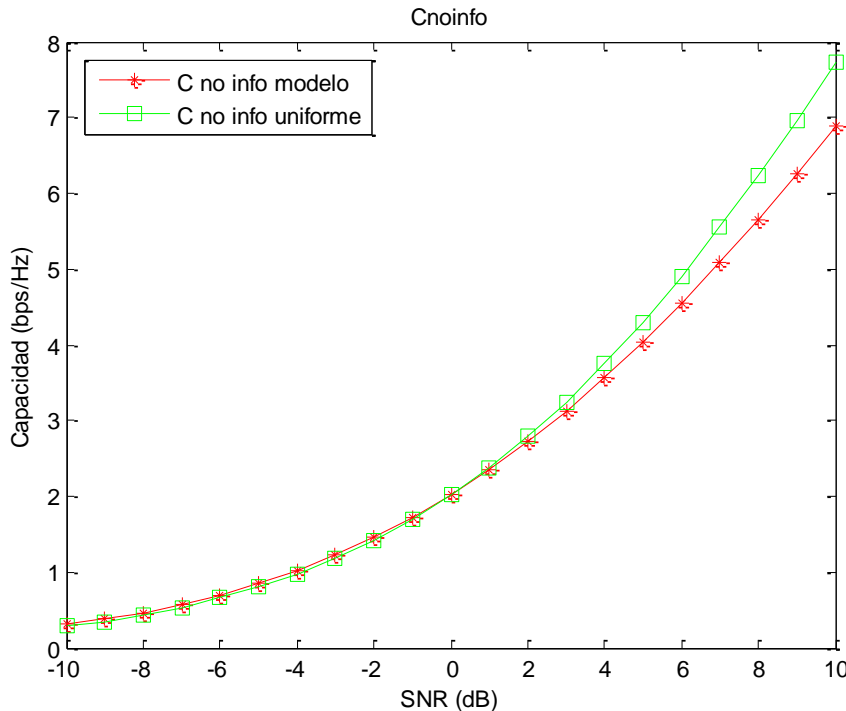


Figura 10: Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular a) con $M=N=3$

En este caso, al no tener información del canal, el reparto de potencia es el mismo tanto para el modelo como para el caso uniforme hasta llegar a los 0 dB, siendo a partir de ahí mejor la uniforme como consecuencia de un mejor reparto de potencia. En la *Tabla 4* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	C no info modelo (bps/Hz)	C no info uniforme (bps/Hz)
-10	0.3054	0.2820
-5	0.8462	0.8047
0	2.0200	2.0236
5	4.0337	4.3013
10	6.8937	7.7340

Tabla 4: valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular a) con $M=N=3$

Los resultados de capacidad en este caso, como se observa en la *Tabla 4*, son ligeramente peores que en los dos casos anteriores, como consecuencia de no tener información del canal en el transmisor.

5.2.1.2 M=N=4

En el caso de que tengamos cuatro antenas tanto en el transmisor como en el receptor, los autovalores de la matriz \mathbf{H} vienen reflejados en la *Tabla 5*.

\mathbf{H} uniforme	2.6609	1.8954	0.8859	0.2721
\mathbf{H} modelo	3.0556	1.6263	0.4998	0.1490

Tabla 5: autovalores de la matriz \mathbf{H} para dispersión angular a) con $M=N=4$

En este caso, nos encontramos con que tenemos para el caso uniforme tres modos de potencia activos, mientras que para el caso del modelo, tenemos dos modos de potencia dominantes, mientras que podría existir un tercer modo, siguiendo la línea que se observaba en el caso de $M=N=3$.

5.2.1.2.1 CDIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7a*), en el caso de CDIT, se recoge en la *Figura 11*.

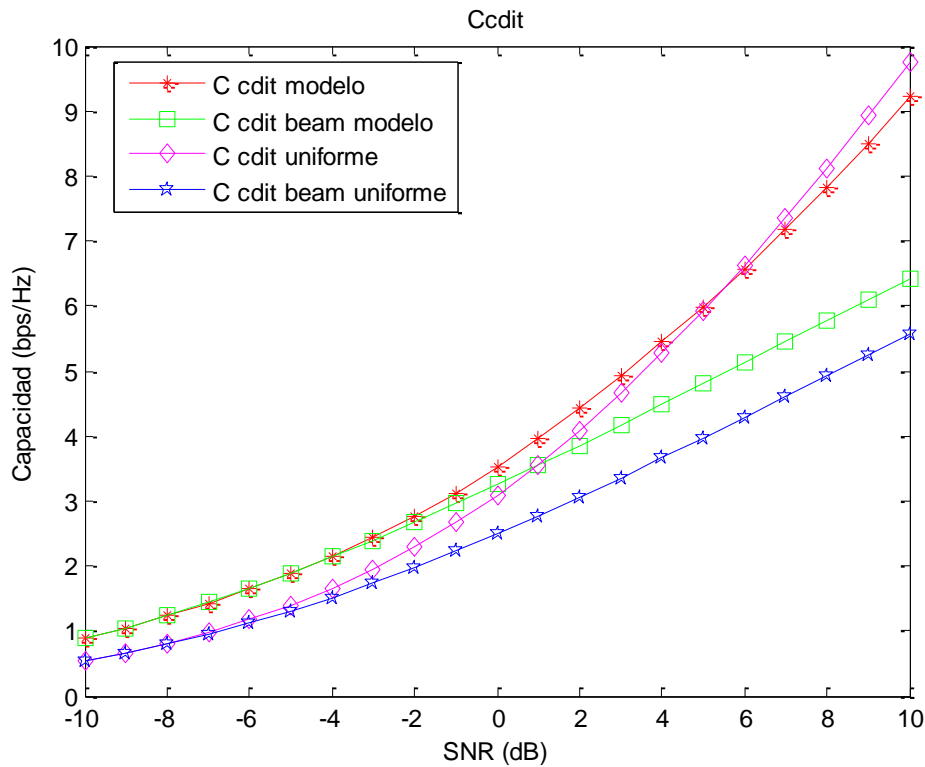


Figura 11: Capacidad CDIT para dispersión angular a) con $M=N=4$

Como se observa en la *Figura 11*, la capacidad sigue el mismo patrón que para el caso de tener 3 antenas en transmisión y recepción, siendo la única variación el aumento de la capacidad, como consecuencia del aumento del número de antenas. En la *Tabla 6* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCDIT modelo (bps/Hz)	CCDIT BF modelo (bps/Hz)	CCDIT uniforme (bps/Hz)	CCDIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	0.8890	0.8890	0.5519	0.5502
-5	1.8838	1.8851	1.3994	1.3034
0	3.5222	3.2507	3.0922	2.4964
5	5.9855	4.8041	5.9244	3.9710
10	9.2230	6.4293	9.7625	5.5676

Tabla 6: valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular a) con $M=N=4$

5.2.1.2.2 CSIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la Figura 7a), en el caso de CSIT, se recoge en la Figura 12.

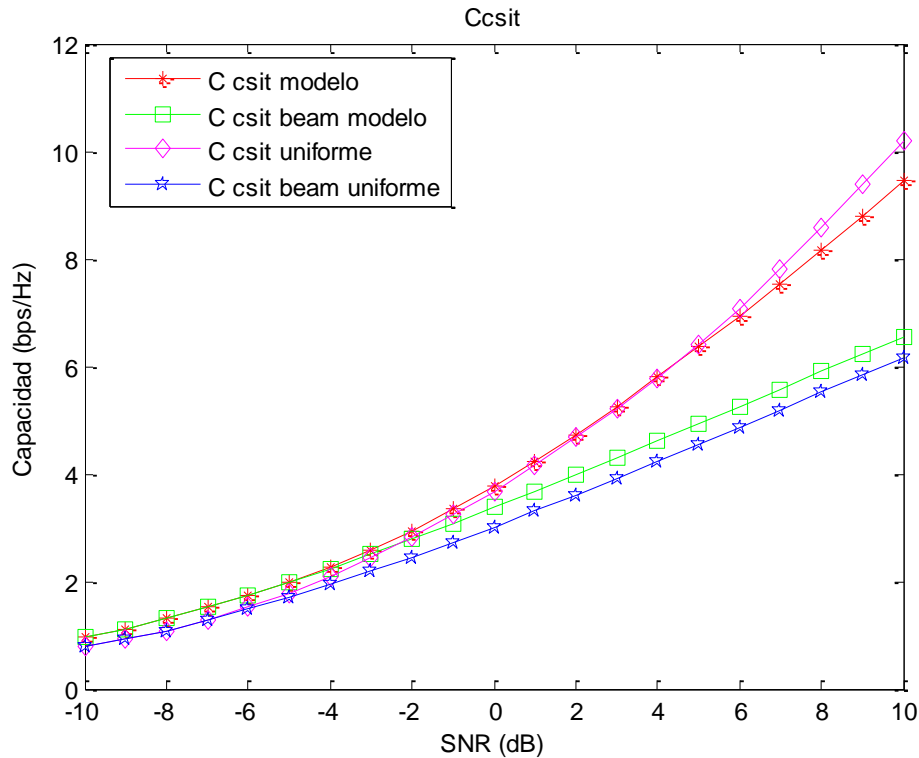


Figura 12: Capacidad CSIT para dispersión angular a) con $M=N=4$

Al igual que ocurría en el caso de tener 3 antenas transmisoras y receptoras, se puede observar en la Figura 12 que se sigue el mismo patrón, difiriendo solo en que aumenta la diferencia de capacidad con respecto al caso de CDIT, como consecuencia de tener más antenas. En la Tabla 7 podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCSIT modelo (bps/Hz)	CCSIT BF modelo (bps/Hz)	CCSIT uniforme (bps/Hz)	CCSIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	0.9514	0.9514	0.7724	0.7724
-5	1.9874	1.9828	1.7837	1.6956
0	3.7675	3.3697	3.6798	3.0145
5	6.3600	4.9320	6.4037	4.5479
10	9.4406	6.5603	10.2073	6.1660

Tabla 7: valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular a) con $M=N=4$

5.2.1.2.3 Sin información del canal en el transmisor

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la Figura 7a), en el caso de que no tengamos información del canal, se recoge en la Figura 13.

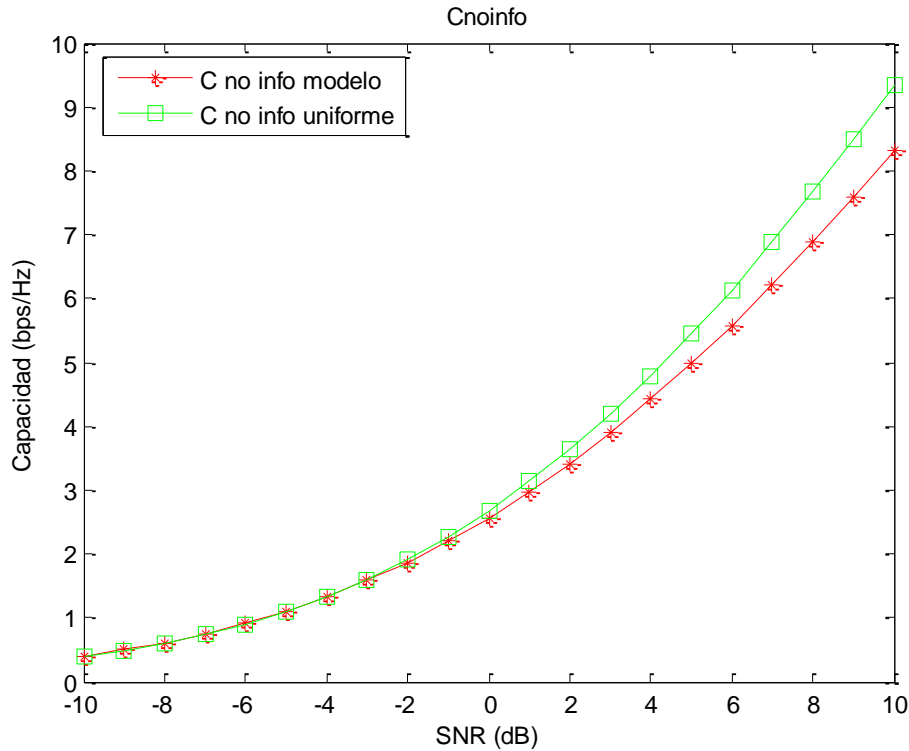


Figura 13: Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular a) con $M=N=4$

Como era de esperar, a tenor de los resultados para los dos casos anteriores, en el caso de que no tengamos información del canal sólo varía con respecto al caso anterior en que la capacidad aumenta como consecuencia del aumento en el número de antenas, siendo a su vez mayor la diferencia entre el caso de no tener información del canal y los caso CDIT y CSIT. En la Tabla 8 podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	C no info modelo (bps/Hz)	C no info uniforme (bps/Hz)
-10	0.4048	0.3899
-5	1.1022	1.0973
0	2.5650	2.6795
5	4.9804	5.4416
10	8.3116	9.3559

Tabla 8: valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular a) con $M=N=4$

5.2.1.3 M=N=6

En el caso de que tengamos seis antenas tanto en el transmisor como en el receptor, los autovalores de la matriz \mathbf{H} vienen reflejados en la *Tabla 9*.

\mathbf{H} uniforme	3.7073	2.1677	1.5092	1.1976	1.0247	0.5359
\mathbf{H} modelo	5.2326	2.0741	1.4227	0.5367	0.2047	0.0845

Tabla 9: autovalores de la matriz \mathbf{H} para dispersión angular a) con $M=N=6$

En este caso, para el caso uniforme observamos cinco modos de potencia activos, pudiendo tener un sexto modo mientras que, en el caso del modelo, obtenemos tres modos dominantes y un posible cuarto modo, existiendo así mayor diferencia en modos a medida que se aumentan el número de antenas, aunque en este caso la diferencia no es muy notable, como consecuencia de que la dispersión angular del modelo que se está utilizando es muy amplia, lo que hace que no haya mucha diferencia con respecto a una dispersión angular uniforme.

5.2.1.3.1 CDIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7a*), en el caso de CDIT, se recoge en la *Figura 14*.

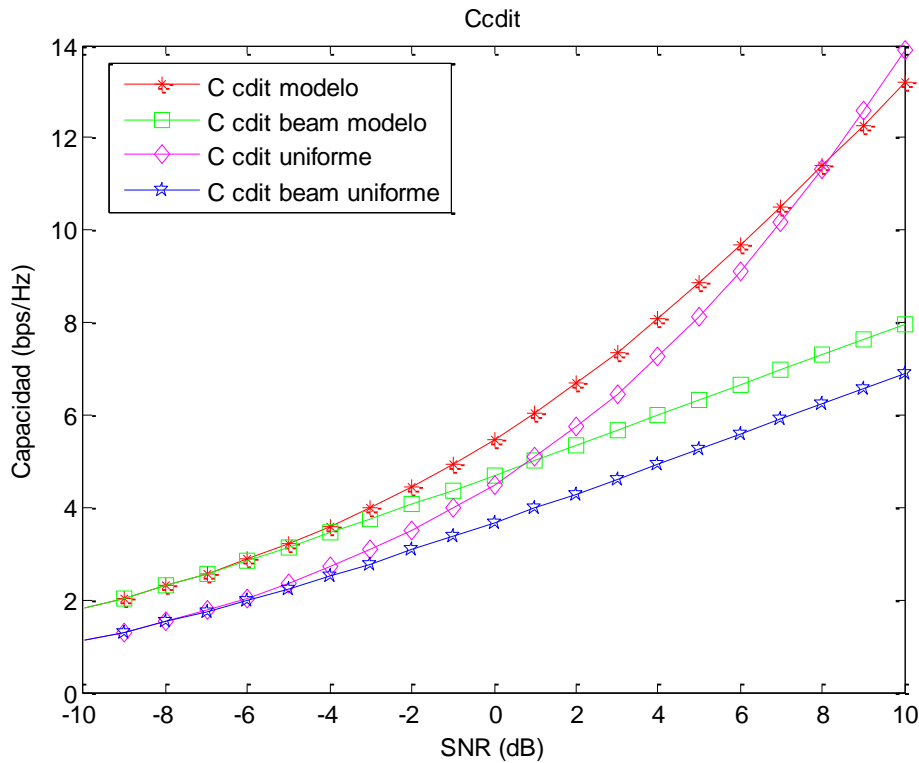


Figura 14: Capacidad CDIT para dispersión angular a) con $M=N=6$

Como se ha visto en los casos anteriores y a tenor de lo que se observa en la *Figura 14*, la única diferencia es en el aumento de la capacidad, siendo este un aumento más significativo en este caso, como consecuencia de que hemos aumentado en 2 el número de antenas transmisoras y receptoras, mientras que en el anterior caso solo se

aumentó en 1. En la *Tabla 10* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCDIT modelo (bps/Hz)	CCDIT BF modelo (bps/Hz)	CCDIT uniforme (bps/Hz)	CCDIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	1.8019	1.8019	1.1195	1.1202
-5	3.2216	3.1418	2.3567	2.2363
0	5.4586	4.6931	4.4966	3.6711
5	8.8682	6.3155	8.1296	5.2525
10	13.2110	7.9640	13.9141	6.8873

Tabla 10: valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular a) con $M=N=6$

5.2.1.3.2 CSIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7a*), en el caso de CSIT, se recoge en la *Figura 15*.

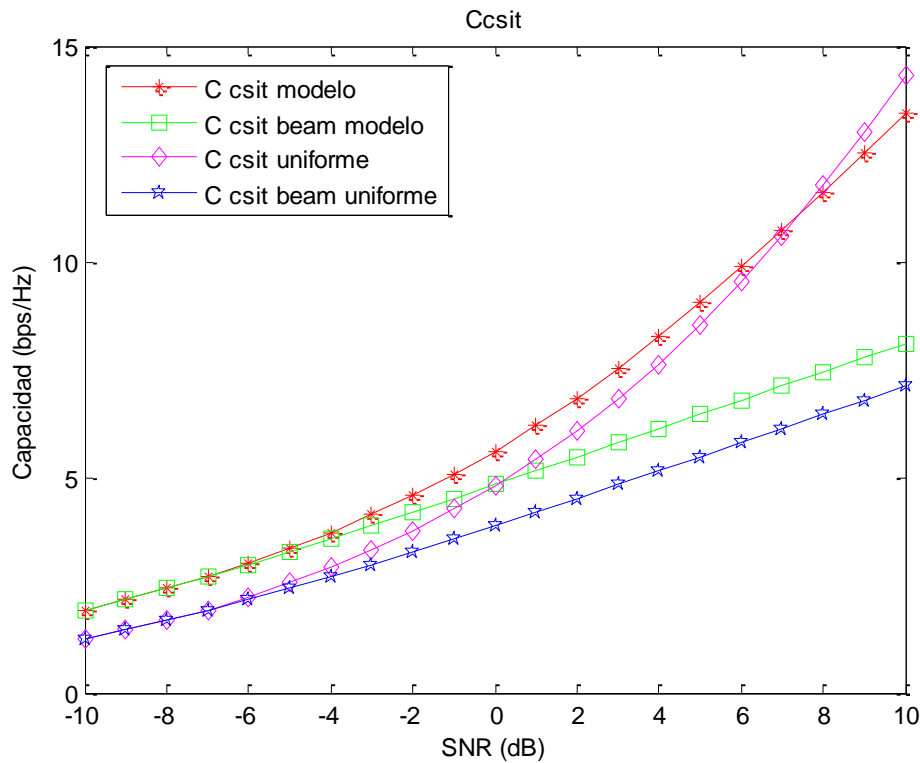


Figura 15: Capacidad CSIT para dispersión angular a) con $M=N=6$

Como se observa en la *Figura 15*, sigue el mismo patrón que para un número menor de antenas, variando únicamente en que existe una mayor capacidad como consecuencia de tener más antenas en transmisión y recepción. En la *Tabla 11* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCSIT modelo (bps/Hz)	CCSIT BF modelo (bps/Hz)	CCSIT uniforme (bps/Hz)	CCSIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	1.9023	1.9023	1.2479	1.2476
-5	3.3341	3.2718	2.5478	2.4185
0	5.5966	4.8268	4.8045	3.8820
5	9.0608	6.4526	8.5265	5.4745
10	13.4270	8.1022	14.3279	7.1131

Tabla 11: valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular a) con $M=N=6$

Como se observa comparando las tablas de CDIT y CSIT, la diferencia de capacidad va aumentando, si bien no es suficientemente grande, contra más antenas pongamos más diferencia existirá.

5.2.1.3.3 Sin información del canal en el transmisor

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la Figura 7a), en el caso de que no tengamos información del canal, se recoge en la Figura 16.

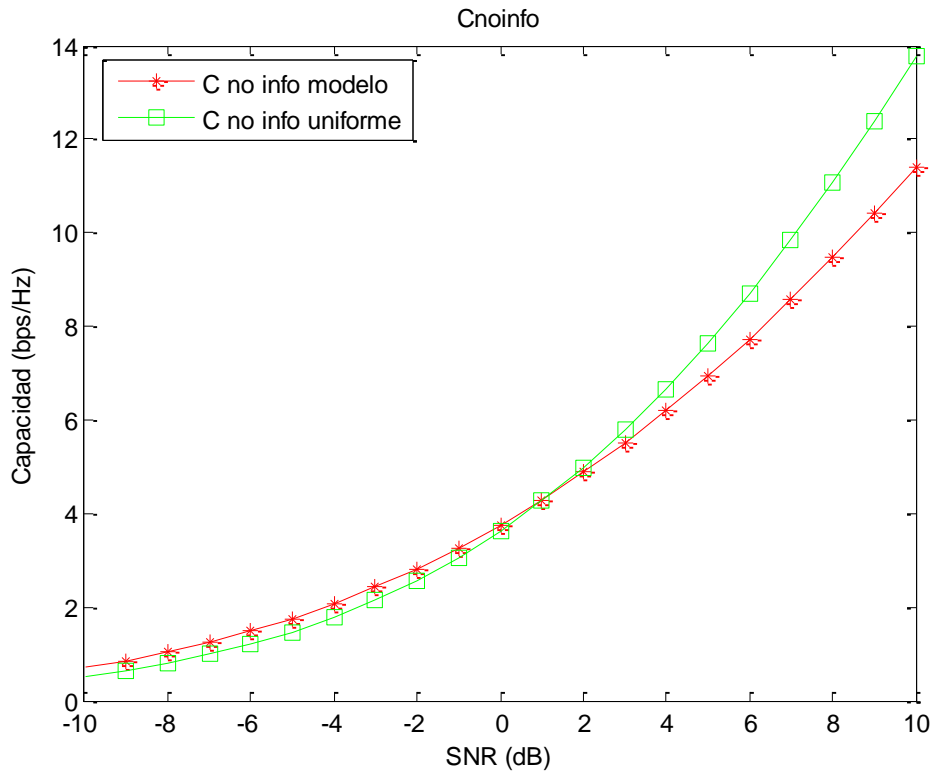


Figura 16: Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular a) con $M=N=6$

Como era de esperar, el único cambio reside en el aumento de capacidad aunque, al no tener información del canal en el transmisor, a medida que aumentamos el número de antenas, la diferencia se irá haciendo cada vez más grande con respecto a cuándo tenemos un conocimiento total o parcial del canal, como es de esperar. En la Tabla 12

podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	C no info modelo (bps/Hz)	C no info uniforme (bps/Hz)
-10	0.6982	0.5261
-5	1.7552	1.4733
0	3.7546	3.6264
5	6.3440	7.6297
10	11.3824	13.7690

Tabla 12: valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular a) con $M=N=6$

5.2.2 Dispersión angular b)

En este apartado, vamos a realizar las simulaciones con la dispersión angular que aparece en la *Figura 7b*), exponiéndose a continuación los resultados obtenidos. A priori, esta dispersión angular debería dar unos resultados parecidos a los de la dispersión angular del apartado anterior, ya que son parecidos en cuanto a que tienen una dispersión no muy localizada.

5.2.2.1 M=N=3

En el caso de que tengamos tres antenas tanto en el transmisor como en el receptor, los autovalores de la matriz \mathbf{H} vienen reflejados en la *Tabla 13*.

\mathbf{H} uniforme	2.5079	1.3613	0.6574
\mathbf{H} modelo	3.3142	1.0164	0.3700

Tabla 13: autovalores de la matriz \mathbf{H} para dispersión angular b) con $M=N=3$

Viendo la *Tabla 13*, podemos decir que para el caso uniforme se obtienen tres modos de potencia activos, mientras que en el caso del modelo, se obtienen dos modos dominantes. Estos resultados coinciden con el caso de la dispersión angular anterior.

5.2.2.1.1 CDIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7b*), en el caso de CDIT, se recoge en la *Figura 17*.

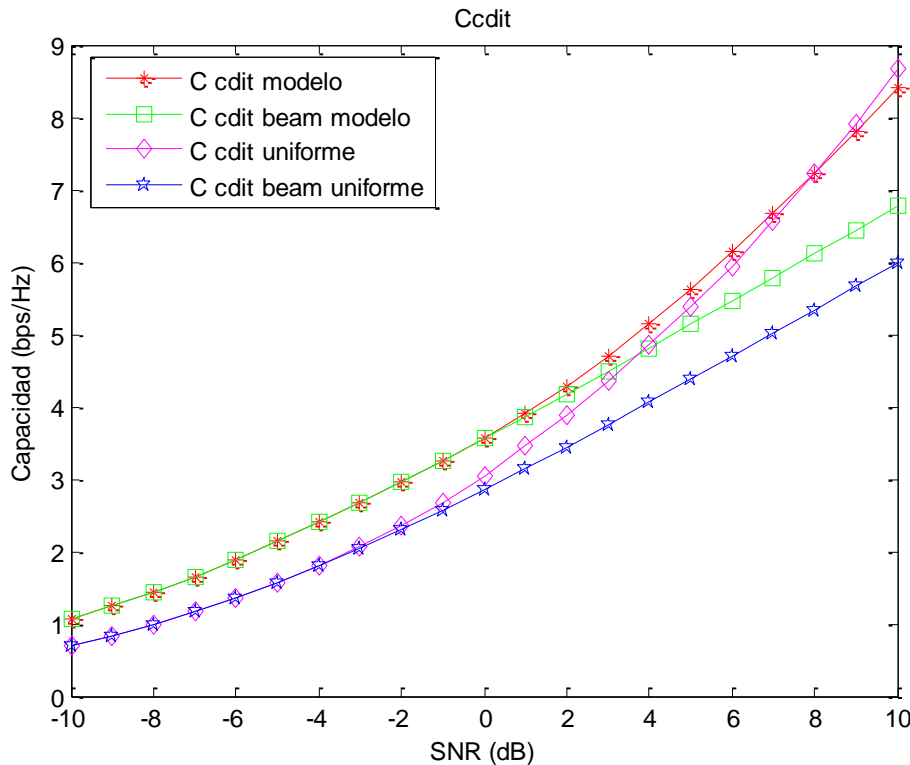


Figura 17: Capacidad CDIT para dispersión angular b) con $M=N=3$

Como se observa en la *Figura 17*, los resultados de capacidad obtenidos son parecidos a los de la dispersión angular del apartado anterior, observándose un aumento de la capacidad como consecuencia de ser un poco menos amplia la dispersión a estudio que la anterior, por lo que el reparto de potencia óptima hace que dicha capacidad aumente. Con respecto a las SNR bajas, ocurre lo mismo que anteriormente, es decir, el reparto de potencia para BF y para cuando no se usa BF es el mismo. En la *Tabla 14* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCDIT modelo (bps/Hz)	CCDIT BF modelo (bps/Hz)	CCDIT uniforme (bps/Hz)	CCDIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	1.0561	1.0561	0.6996	0.6996
-5	2.1418	2.1418	1.5715	1.5722
0	3.5646	3.5599	3.0433	2.8562
5	5.6276	5.1347	5.3881	4.3740
10	8.3982	6.7673	8.6689	5.9866

Tabla 14: valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular b) con $M=N=3$

5.2.2.1.2 CSIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7b*), en el caso de CSIT, se recoge en la *Figura 18*.

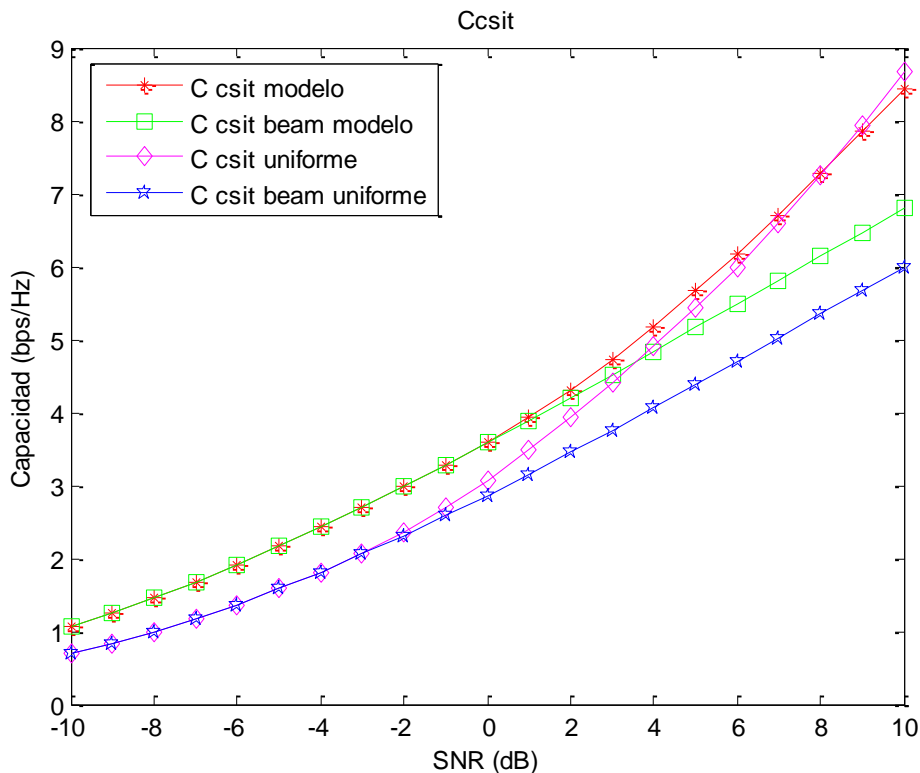


Figura 18: Capacidad CSIT para dispersión angular b) con $M=N=3$

Para este caso, las mismas conclusiones del caso de CDIT sirven, ya que el reparto de potencia óptima es muy parejo, siendo en el caso de CSIT un poco mejores, como ya ocurriese anteriormente, como consecuencia de que conocemos el canal totalmente. En la *Tabla 15* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCSIT modelo (bps/Hz)	CCSIT BF modelo (bps/Hz)	CCSIT uniforme (bps/Hz)	CCSIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	1.0693	1.0693	0.7040	0.7040
-5	2.1614	2.1614	1.5797	1.5797
0	3.5882	3.5830	3.0717	2.8659
5	5.6596	5.1592	5.4408	4.3847
10	8.4385	6.7923	8.6832	5.9977

Tabla 15: valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular b) con $M=N=3$

Si bien la variación del CSIT con respecto a CDIT es casi inapreciable, con respecto al apartado anterior ha aumentado dicha diferencia.

5.2.2.1.3 Sin información del canal en el transmisor

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7b)*, en el caso de que no tengamos información del canal, se recoge en la *Figura 19*.

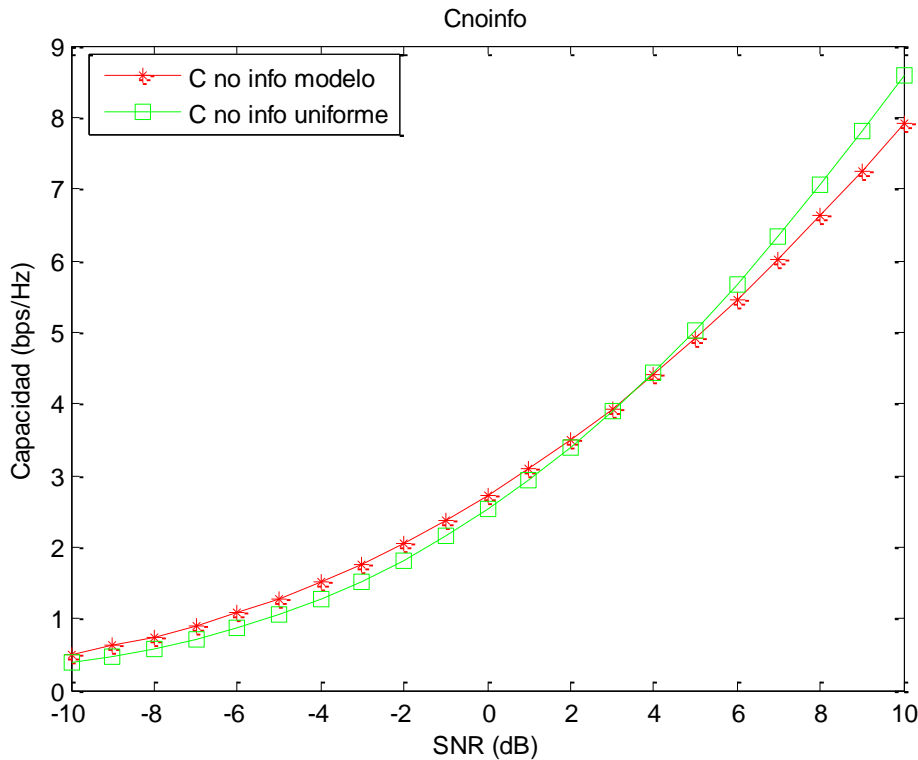


Figura 19: Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular b) con $M=N=3$

Como para los dos casos anteriores, este no podría ser menos, por lo que salen unos resultados parecidos, casi idénticos, con respecto a la dispersión angular anterior. En la *Tabla 16* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	C no info modelo (bps/Hz)	C no info uniforme (bps/Hz)
-10	0.5055	0.3817
-5	1.2793	1.0555
0	2.7120	2.5188
5	4.9101	5.0356
10	7.9272	8.5877

Tabla 16: valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular b) con $M=N=3$

Como puede observarse en la *Tabla 16*, las diferencias con respecto a los otros dos casos, es decir, cuando se conoce total o parcialmente el canal en el transmisor son apreciables, si bien todavía no es una gran diferencia, a medida que utilizamos una dispersión angular menos amplia, vamos obteniendo una mayor diferencia en cuanto a capacidad se refiere.

5.2.2.2 M=N=4

En el caso de que tengamos cuatro antenas tanto en el transmisor como en el receptor, los autovalores de la matriz \mathbf{H} vienen reflejados en la *Tabla 17*.

\mathbf{H} uniforme	2.9699	1.9720	1.4199	0.5403
\mathbf{H} modelo	3.3462	1.3177	1.0081	0.1041

Tabla 17: autovalores de la matriz \mathbf{H} para dispersión angular b) con $M=N=4$

En la *Tabla 17*, podemos ver como para el caso uniforme obtenemos tres modos activos, con un posible cuarto modo, mientras que, para el modelo, obtenemos tres modos dominantes, obteniendo resultados parecidos a la dispersión angular del apartado anterior como cabía de esperar ya que las dispersiones angulares con parecidas, como se dijo anteriormente.

5.2.2.2.1 CDIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7b*), en el caso de CDIT, se recoge en la *Figura 20*.

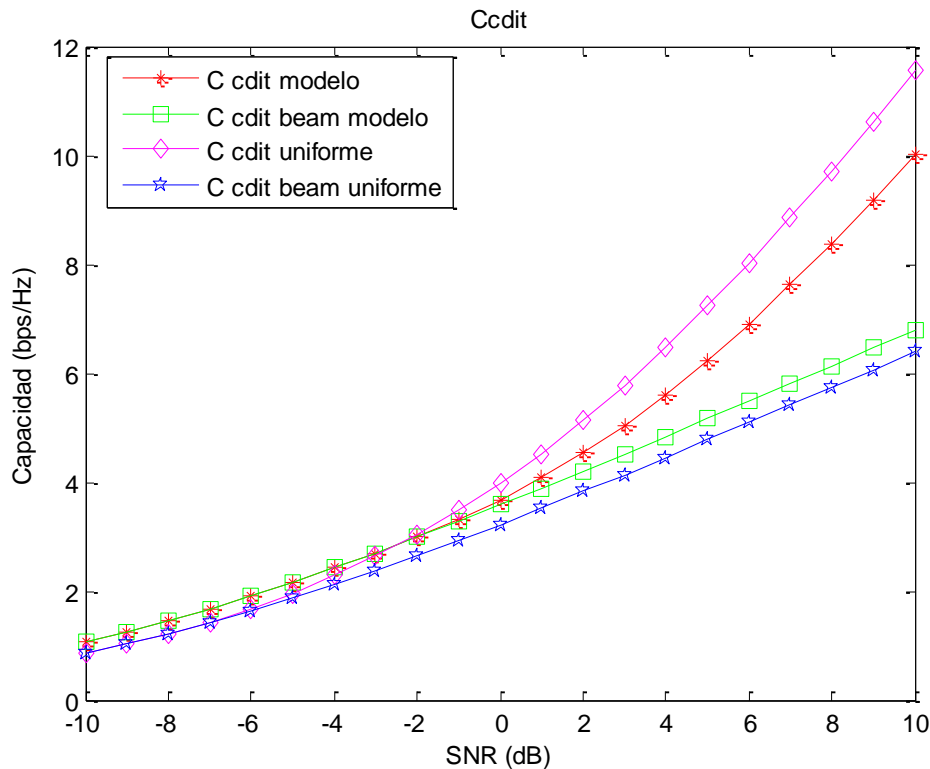


Figura 20: Capacidad CDIT para dispersión angular b) con $M=N=4$

Como se observa en la *Figura 20*, sigue el mismo camino que para $M=N=3$, pero en este caso la capacidad uniforme empieza a predominar antes que en el caso anterior, debido al carácter aleatorio de la matriz \mathbf{H} , siguiendo las demás gráficas el mismo guion que en las anteriores figuras. En la *Tabla 18* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCDIT modelo (bps/Hz)	CCDIT BF modelo (bps/Hz)	CCDIT uniforme (bps/Hz)	CCDIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	1.0688	1.0688	0.8733	0.8739
-5	2.1607	2.1607	1.9595	1.8612
0	3.6689	3.5822	3.9683	3.2214
5	6.2258	5.1584	7.2415	4.7725
10	10.0050	6.7915	11.5505	6.3969

Tabla 18: valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular $b)$ con $M=N=4$

Como se observa, se sigue la misma proporción del aumento de la capacidad que en el caso de la dispersión anterior, como cabría esperar.

5.2.2.2.2 CSIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la Figura 7b), en el caso de CSIT, se recoge en la Figura 21.

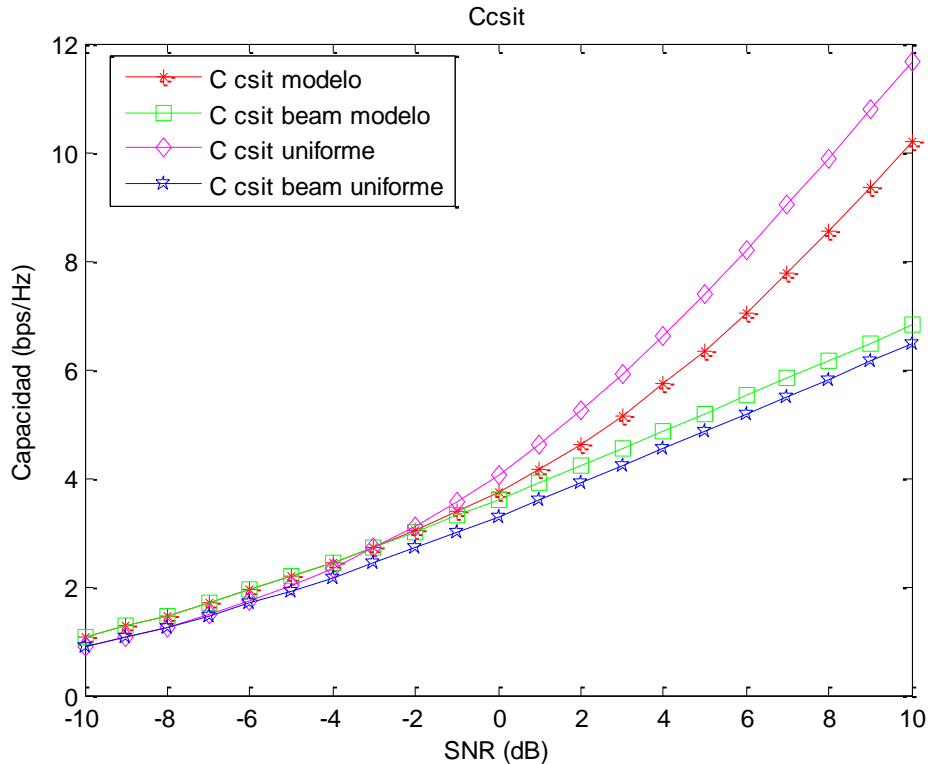


Figura 21: Capacidad CSIT para dispersión angular $b)$ con $M=N=4$

Para el caso de CSIT, las conclusiones son las mismas que para CDIT como se puede observar en la Figura 21, ya que obtenemos una gráfica casi idéntica. En la Tabla 19 podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCSIT modelo (bps/Hz)	CCSIT BF modelo (bps/Hz)	CCSIT uniforme (bps/Hz)	CCSIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	1.0839	1.0839	0.9123	0.9123
-5	2.1830	2.1830	2.0159	1.9219
0	3.7526	3.6085	4.0579	3.2957
5	6.3490	5.1862	7.3880	4.8526
10	10.1760	6.8198	11.6840	6.4790

Tabla 19: valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular b) con $M=N=4$

Como se observa en la Tabla 19, los valores de CSIT son mayores que los de CDIT, aunque la diferencia es casi inapreciable, como consecuencia del reparto de potencia, pero dado que conocemos totalmente el canal en el transmisor, los valores de CSIT son los más altos.

5.2.2.2.3 Sin información del canal en el transmisor

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la Figura 7b), en el caso de que no tengamos información del canal, se recoge en la Figura 22.

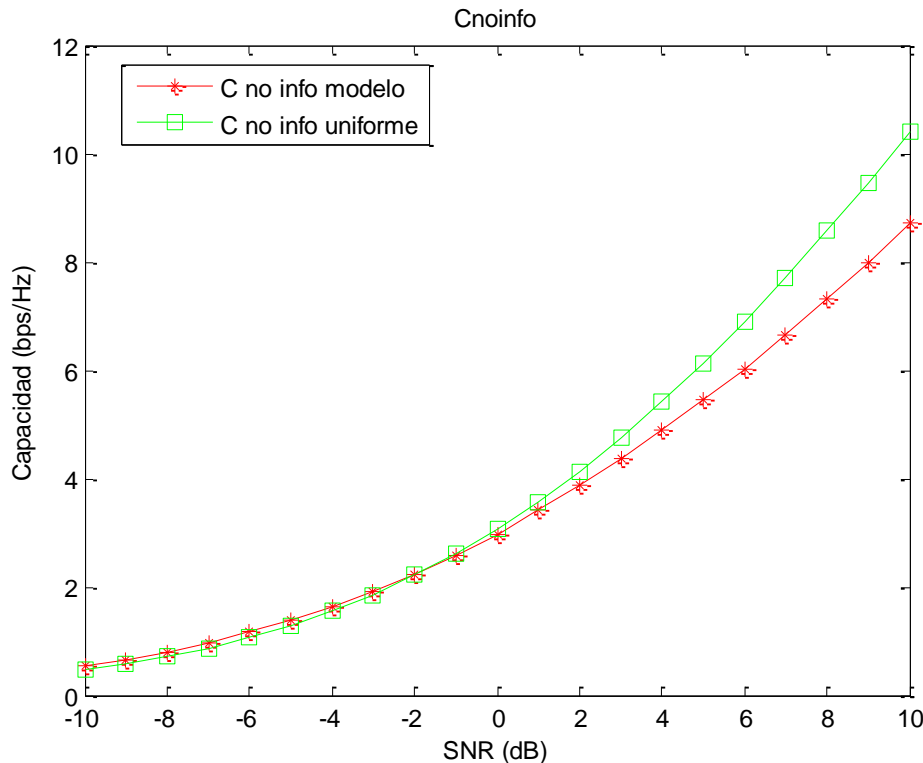


Figura 22: Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular b) con $M=N=4$

El único cambio existente en este caso con respecto al de $M=N=3$ consiste en que empieza a ser mejor el caso uniforme que el del modelo antes que en el caso anterior, pudiendo ser uno de los factores el aumento del número de antenas tanto en transmisión como en recepción. En la Tabla 20 podemos observar con más

detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	C no info modelo (bps/Hz)	C no info uniforme (bps/Hz)
-10	0.5375	0.4645
-5	1.3814	1.2844
0	2.9814	3.0703
5	5.4416	6.1365
10	8.7111	10.3883

Tabla 20: valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular b) con $M=N=4$

Al igual que ocurre en los apartados anteriores, la capacidad cuando no se tiene información es menor que en los casos de CDIT y CSIT.

5.2.2.3 M=N=6

En el caso de que tengamos seis antenas tanto en el transmisor como en el receptor, los autovalores de la matriz \mathbf{H} vienen reflejados en la *Tabla 21*.

\mathbf{H} uniforme	4.9657	3.2943	2.3333	1.4665	0.9368	0.4760
\mathbf{H} modelo	6.0909	2.7031	2.2956	0.4455	0.1701	0.0276

Tabla 21: autovalores de la matriz \mathbf{H} para dispersión angular b) con $M=N=6$

Viendo la *Tabla 21*, se puede ver que, en el caso uniforme, existen cinco modos activos con posibilidad de un sexto modo mientras que, en el caso del modelo, existen tres modos dominantes con posibilidad de un cuarto modo, obteniendo así un resultado muy parecido al caso de la primer dispersión angular que, como ya se dijo anteriormente, es muy parecida a la de este apartado.

5.2.2.3.1 CDIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7b*), en el caso de CDIT, se recoge en la *Figura 23*.

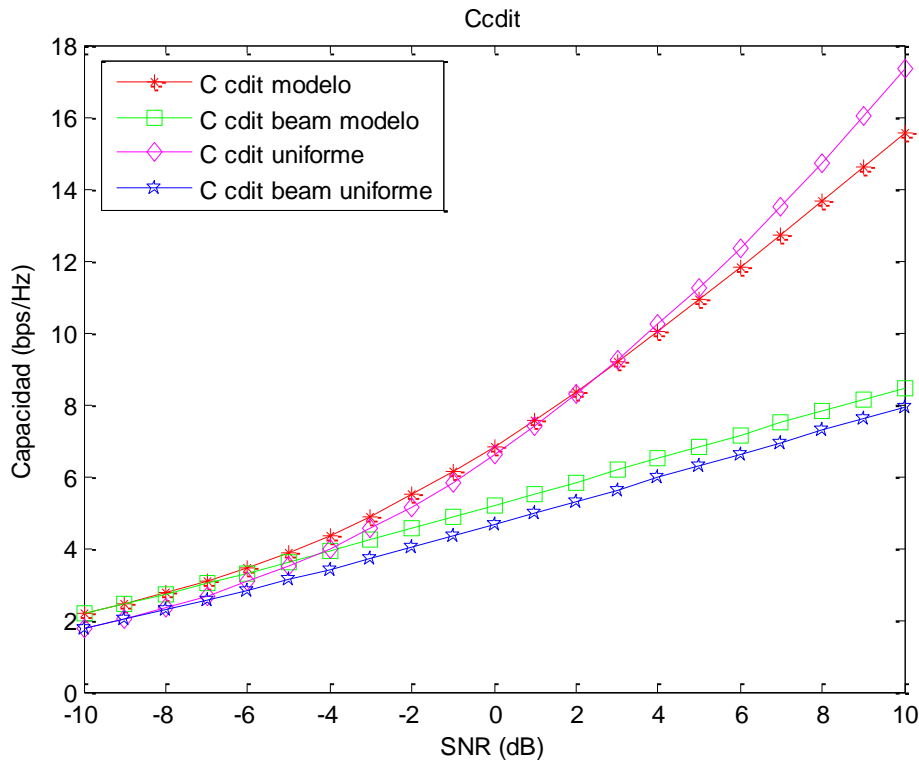


Figura 23: Capacidad CDIT para dispersión angular b) con $M=N=6$

En la *Figura 23* se puede observar cómo, a medida que aumentamos el número de antenas, la diferencia entre el uso de BF y el no uso se acentúa, como consecuencia de tener poca correlación y una dispersión angular muy dispersa. En la *Tabla 22* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCDIT modelo (bps/Hz)	CCDIT BF modelo (bps/Hz)	CCDIT uniforme (bps/Hz)	CCDIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	2.1825	2.1832	1.7791	1.7779
-5	3.8725	3.6088	3.5008	3.1181
0	6.8295	5.1865	6.5930	4.6607
5	10.9009	6.8201	11.2628	6.2821
10	15.5490	8.4723	17.3655	7.9303

Tabla 22: valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular b) con $M=N=6$

En la Tabla 22 se ve como cuando aumentamos de cuatro a seis el número de antenas transmisoras y receptoras aumenta de forma considerable la capacidad.

5.2.2.3.2 CSIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la Figura 7b), en el caso de CSIT, se recoge en la Figura 24.

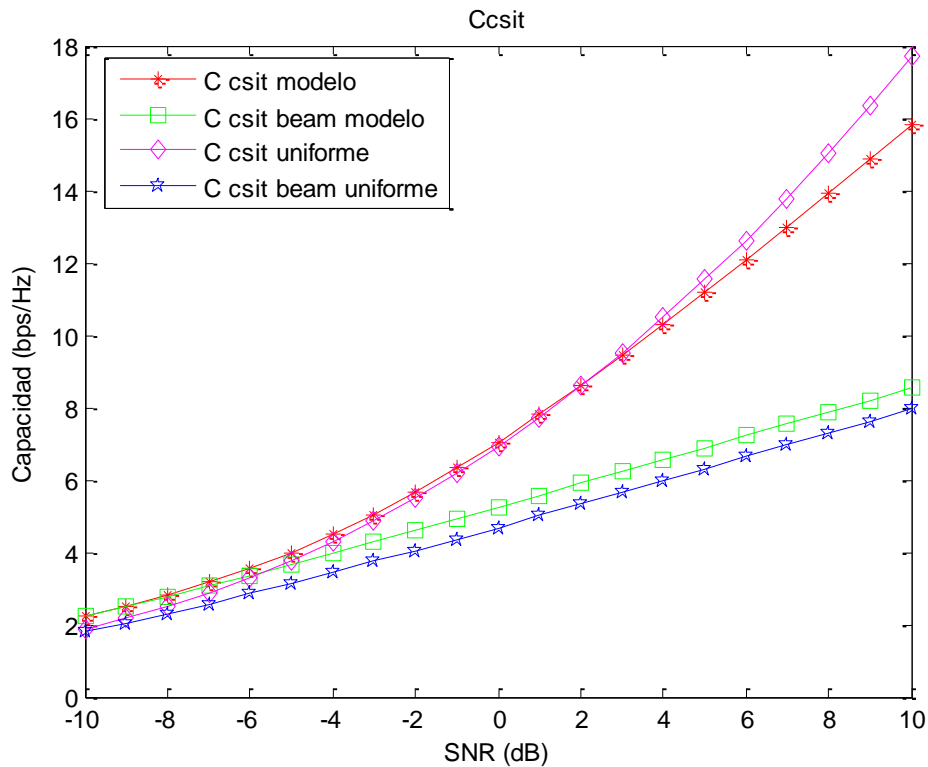


Figura 24: Capacidad CSIT para dispersión angular b) con $M=N=6$

No hay mucho de comentar de esta figura, ya que es prácticamente igual que la anterior, únicamente difieren en que la capacidad es ligeramente mayor en el caso de CSIT, aumentando la diferencia de capacidad a medida que aumentamos el número de antenas, como ya se vio anteriormente. En la Tabla 23 podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCSIT modelo (bps/Hz)	CCSIT BF modelo (bps/Hz)	CCSIT uniforme (bps/Hz)	CCSIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	2.2357	2.2357	1.8570	1.7932
-5	3.9908	3.6704	3.7720	3.1371
0	7.0357	5.2517	6.9436	4.6814
5	11.1670	6.8865	11.5316	6.3034
10	15.8416	8.5391	17.6926	7.9518

Tabla 23: valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular b) con $M=N=6$

5.2.2.3.3 Sin información del canal en el transmisor

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la Figura 7b), en el caso de que no tengamos información del canal, se recoge en la Figura 25.

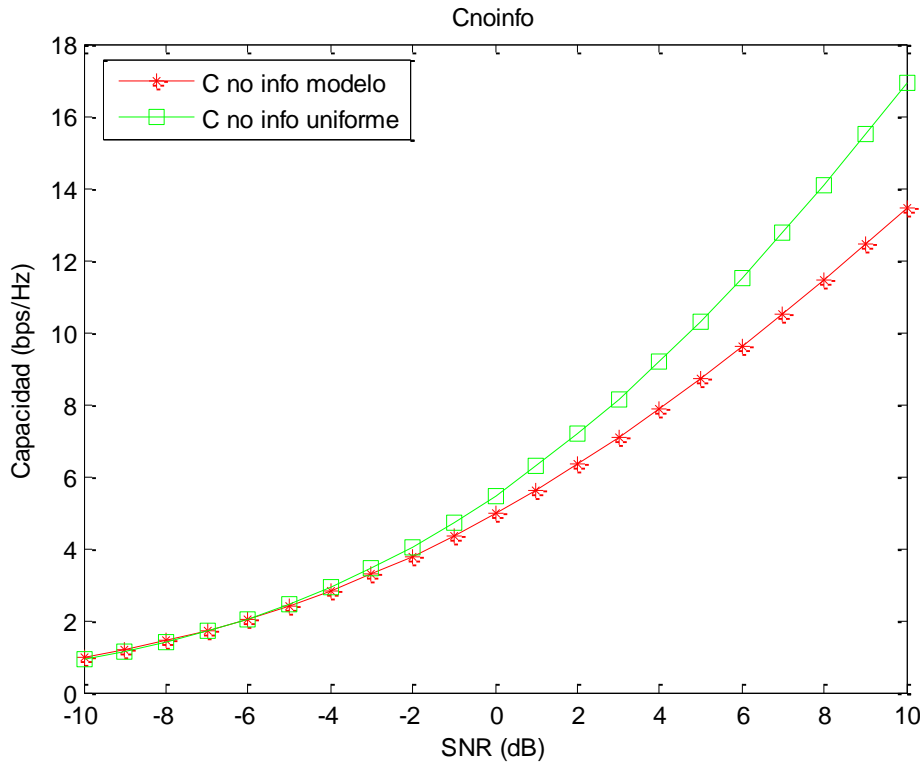


Figura 25: Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular b) con $M=N=6$

Como ocurría en la anterior gráfica para $M=N=4$, el caso uniforme cada vez supera a una SNR más baja al del modelo, como ha ido pasando a medida que se han ido aumentando el número de antenas. En la Tabla 24 podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	C no info modelo (bps/Hz)	C no info uniforme (bps/Hz)
-10	0.9872	0.9391
-5	2.4042	2.4552
0	4.9573	5.4672
5	8.7229	10.3119
10	13.4659	16.9419

Tabla 24: valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular b) con $M=N=6$

Como ha ido ocurriendo en los anteriores casos, como es lógico, la capacidad cuando no tenemos información es menor que para CSIT y CDIT.

5.2.3 Dispersión angular c)

En este apartado, vamos a realizar las simulaciones con la dispersión angular que aparece en la *Figura 7c*), exponiéndose a continuación los resultados obtenidos.

5.2.3.1 M=N=3

En el caso de que tengamos tres antenas tanto en el transmisor como en el receptor, los autovalores de la matriz \mathbf{H} vienen reflejados en la *Tabla 25*.

\mathbf{H} uniforme	1.9449	1.3990	0.5078
\mathbf{H} modelo	2.8012	0.7836	0.4630

Tabla 25: autovalores de la matriz \mathbf{H} para dispersión angular c) con $M=N=3$

En el caso de esta dispersión angular, como se puede ver en la *Tabla 25*, nos encontramos con que, para el caso uniforme, tenemos dos modos activos y un posible tercero, al igual que ocurre en el modelo en este caso, dando en resultado parecido a las dos dispersiones angulares anteriores, como consecuencia de que la dispersión angular sigue siendo amplia, aunque cada vez menos.

5.2.3.1.1 CDIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7c*), en el caso de CDIT, se recoge en la *Figura 26*.

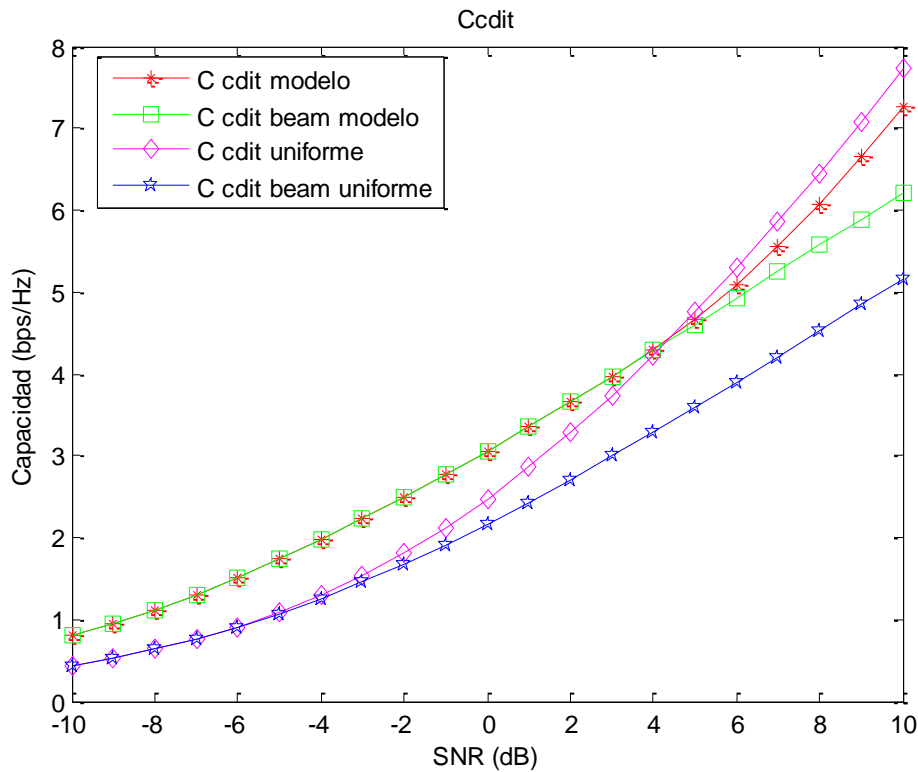


Figura 26: Capacidad CDIT para dispersión angular c) con $M=N=3$

Como puede verse en la *Figura 26*, el reparto de potencia para el modelo, tanto para cuando se usa BF como cuando no, es más eficiente para SNR menores de 4 dB mientras que, a partir de ahí, observamos cómo se impone el modelo. Esto ocurre porque tenemos pocas antenas transmisoras y receptoras y, por tanto, pueden llegar a ocurrir estos casos. A continuación, cuando realicemos el estudio para más antenas, podremos ver como el predominio del modelo llegará hasta menos dB, ya que la dispersión angular todavía es amplia, por lo que el BF no debería ser eficiente todavía. En la *Tabla 26* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCDIT modelo (bps/Hz)	CCDIT BF modelo (bps/Hz)	CCDIT uniforme (bps/Hz)	CCDIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	0.7958	0.7958	0.4320	0.4321
-5	1.7344	1.7344	1.0844	1.0734
0	3.0635	3.0635	2.4693	2.1675
5	4.6664	4.6014	4.7493	3.5902
10	7.2683	6.2211	7.7401	5.1669

Tabla 26: valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular c) con $M=N=3$

5.2.3.1.2 CSIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7c*), en el caso de CSIT, se recoge en la *Figura 27*.

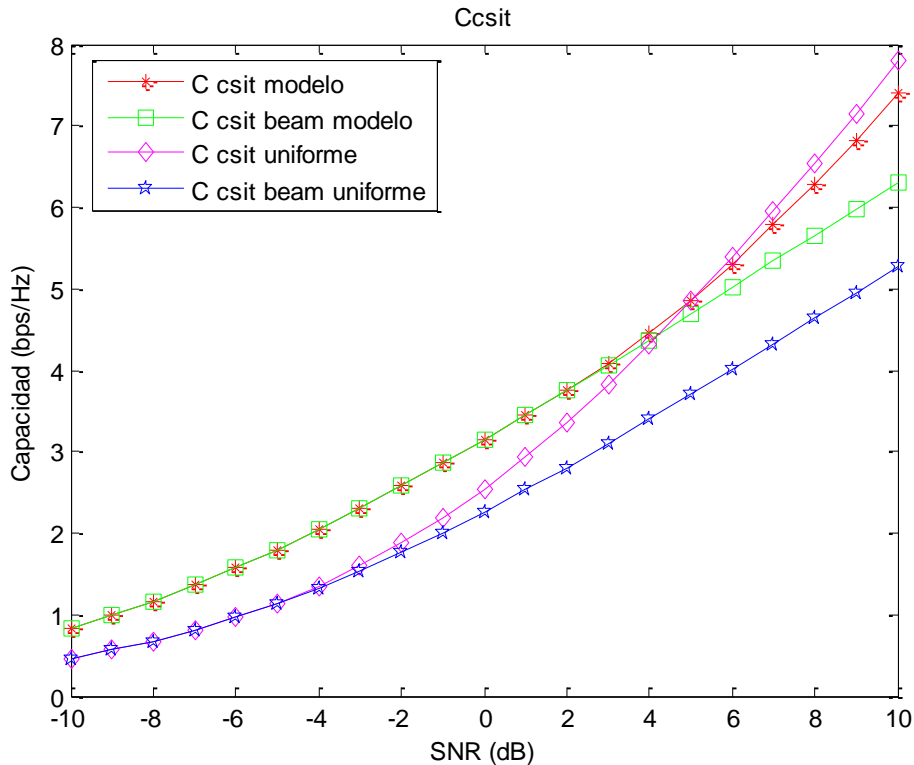


Figura 27: Capacidad CSIT para dispersión angular c) con $M=N=3$

Para el caso de CSIT vale el mismo comentario que en el caso de CDIT, siendo también como es de esperar, ligeramente mejor la capacidad para CSIT que en el caso de CDIT. En la *Tabla 27* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCSIT modelo (bps/Hz)	CCSIT BF modelo (bps/Hz)	CCSIT uniforme (bps/Hz)	CCSIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	0.8357	0.8357	0.4629	0.4629
-5	1.7997	1.7997	1.1409	1.1350
0	3.1452	3.1452	2.5443	2.2578
5	4.8648	4.6901	4.8428	3.6962
10	7.4042	6.3123	7.7975	5.2790

Tabla 27: valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular c) con $M=N=3$

5.2.3.1.3 Sin información del canal en el transmisor

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7c*), en el caso de que no tengamos información del canal, se recoge en la *Figura 28*.

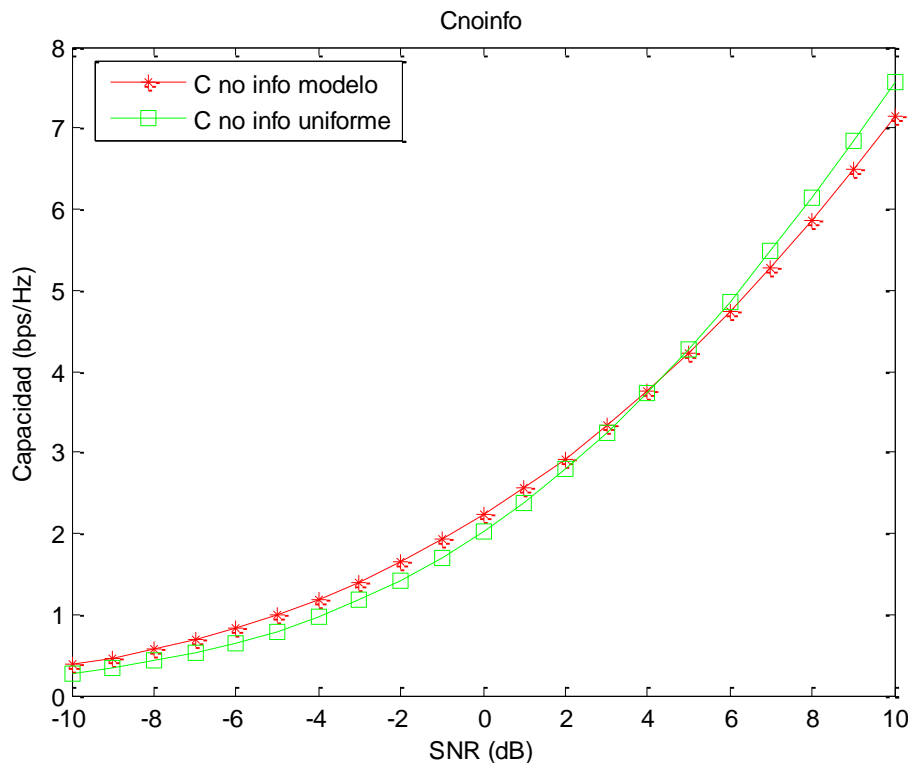


Figura 28: Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular c) con $M=N=3$

Como ocurre en el caso de CSIT y CDIT, hasta 4 dB domina el modelo mientras que, a partir de ahí, se impone el caso uniforme, como es lógico, ya que existe un paralelismo entre todos los casos. Como es de esperar, la capacidad es menor que en los casos de CSIT y CDIT, esperando que la diferencia cada vez sea mayor. En la *Tabla 28*

podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	C no info modelo (bps/Hz)	C no info uniforme (bps/Hz)
-10	0.3747	0.2749
-5	0.9923	0.7934
0	2.2225	2.0204
5	4.2268	4.2802
10	7.1484	7.5730

Tabla 28: valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular c) con $M=N=3$

La diferencia que obtenemos en el caso de la uniforme entre cuando no se tiene información del canal y en el caso de CSIT, por ejemplo, es de 0.22 bps/Hz mientras que, en el caso de la primera dispersión angular, la diferencia era de 0.05 bps/Hz, observando que, a medida que la dispersión es menos amplia, la diferencia se va haciendo mayor. A medida que vayamos avanzando, veremos si esto se sigue cumpliendo o no, pero viendo cómo va desarrollándose, podemos decir que seguramente se vaya cumpliendo que la diferencia sea cada vez mayor.

5.2.3.2 M=N=4

En el caso de que tengamos cuatro antenas tanto en el transmisor como en el receptor, los autovalores de la matriz \mathbf{H} vienen reflejados en la *Tabla 29*.

\mathbf{H} uniforme	3.4666	2.3850	0.6842	0.3748
\mathbf{H} modelo	3.5832	1.8328	0.3616	0.0583

Tabla 29: autovalores de la matriz \mathbf{H} para dispersión angular c) con $M=N=4$

En el caso uniforme, obtenemos tres modos activos, mientras que, en el caso del modelo, obtenemos dos modos de potencia dominantes, obteniendo resultados parecidos a las dos dispersiones angulares anteriores, como era de esperar. Más adelante, para el caso de $M=N=6$ veremos si se sigue cumpliendo esa tendencia.

5.2.3.2.1 CDIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7c*), en el caso de CDIT, se recoge en la *Figura 29*.

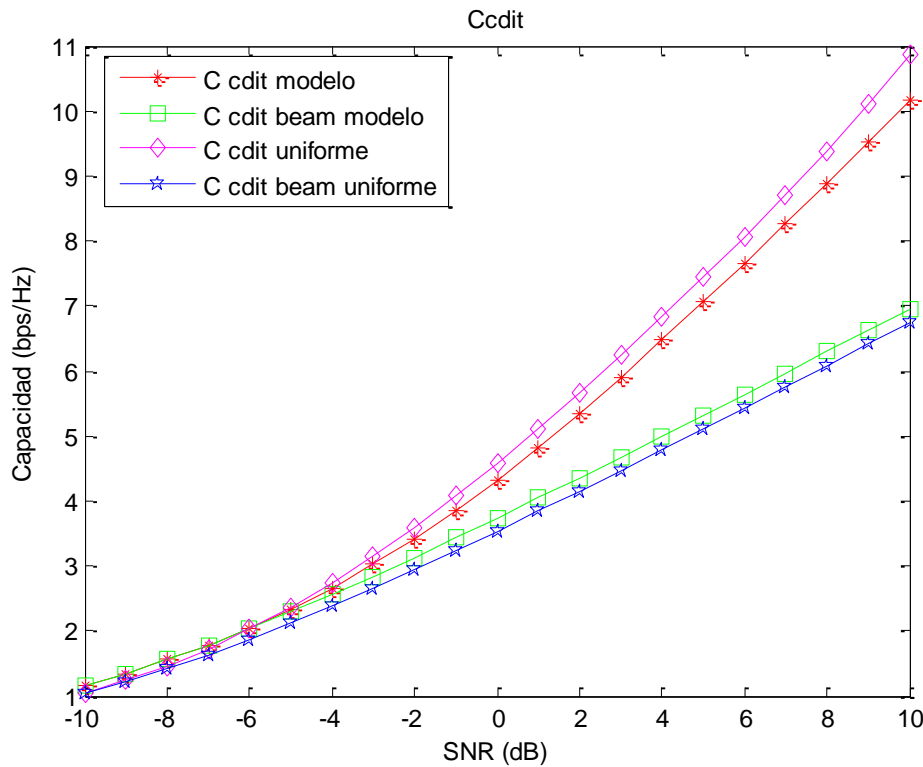


Figura 29: Capacidad CDIT para dispersión angular c) con $M=N=4$

Como se observa en la *Figura 29*, como hemos aumentado el número de antenas, el modelo ya solo predomina para SNR bajas, normalizándose así la situación que ocurría en el caso anterior. En la *Tabla 30* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCDIT modelo (bps/Hz)	CCDIT BF modelo (bps/Hz)	CCDIT uniforme (bps/Hz)	CCDIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	1.1563	1.1564	1.0448	1.0422
-5	2.3318	2.2887	2.3643	2.1210
0	4.3309	3.7322	4.5860	3.5353
5	7.0585	5.3170	7.4494	5.1085
10	10.1619	6.9530	10.8725	6.7406

Tabla 30: valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular $c)$ con $M=N=4$

Viendo los datos de la Tabla 30, vemos como ha aumentado la capacidad como consecuencia de aumentar el número de antenas en transmisión y recepción.

5.2.3.2.2 CSIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la Figura 7c), en el caso de CSIT, se recoge en la Figura 30.

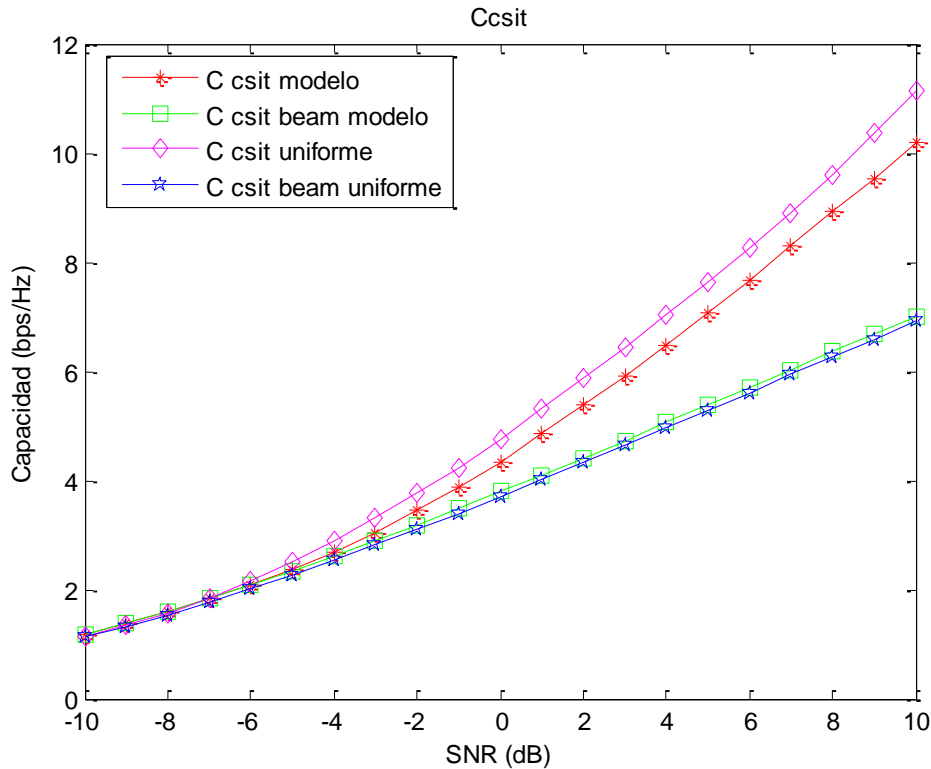


Figura 30: Capacidad CSIT para dispersión angular $c)$ con $M=N=4$

La correlación en este caso es muy baja, ya que, para BF, vemos como las dos gráficas son casi idénticas, como consecuencia de que la dispersión es muy amplia. Los valores de capacidad para CSIT son mejores que para CDIT, como ocurre siempre, siendo mayor la diferencia a medida que aumentamos el número de antenas. En la Tabla 31 podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCSIT modelo (bps/Hz)	CCSIT BF modelo (bps/Hz)	CCSIT uniforme (bps/Hz)	CCSIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	1.1915	1.1915	1.1392	1.1386
-5	2.3675	2.3392	2.4995	2.2631
0	4.3507	3.7907	4.7596	3.7023
5	7.0764	5.3786	7.6441	5.2855
10	10.1809	7.0156	11.1401	6.9209

Tabla 31: valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular c) con $M=N=4$

5.2.3.2.3 Sin información del canal en el transmisor

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la Figura 7c), en el caso de que no tengamos información del canal, se recoge en la Figura 31.

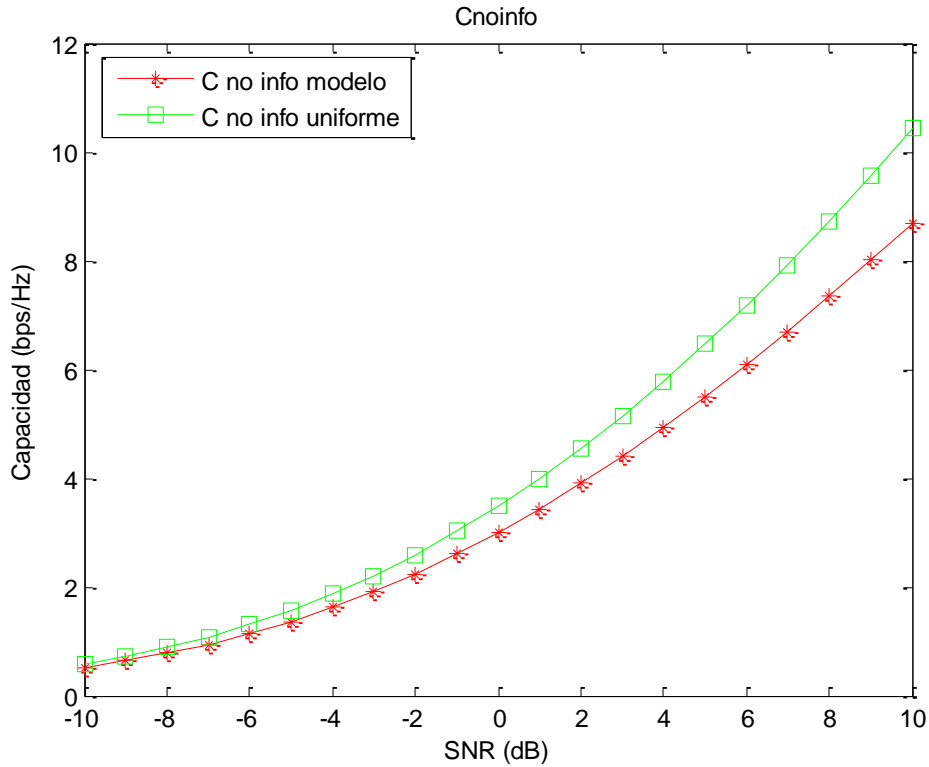


Figura 31: Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular c) con $M=N=4$

Como ha ido ocurriendo para los casos de CSIT y CDIT, observamos como el caso uniforme cada vez se va imponiendo a SNR más bajas a medida que aumentamos el número de antenas transmisoras y receptoras. En la Tabla 32 podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB. Vemos como el valor de la capacidad cuando no existe información del canal es visiblemente más baja que en los casos de CDIT y CSIT, como era de esperar.

SNR (dB)	C no info modelo (bps/Hz)	C no info uniforme (bps/Hz)
-10	0.5228	0.5926
-5	1.3658	1.5676
0	3.0009	3.4872
5	5.4949	6.4571
10	8.7013	10.4361

Tabla 32: valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular c) con $M=N=4$

5.2.3.3 M=N=6

En el caso de que tengamos seis antenas tanto en el transmisor como en el receptor, los autovalores de la matriz \mathbf{H} vienen reflejados en la *Tabla 33*.

\mathbf{H} uniforme	4.6906	2.9346	2.0890	1.4899	1.1818	0.7166
\mathbf{H} modelo	5.0345	3.6266	1.3995	0.8921	0.3612	0.0895

Tabla 33: autovalores de la matriz \mathbf{H} para dispersión angular c) con $M=N=6$

En el caso uniforme, como puede observarse, obtenemos seis modos de potencia activos, mientras que, en el caso del modelo, obtenemos 4 modos dominantes, siguiendo la senda de las dos dispersiones angulares anteriores.

5.2.3.3.1 CDIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7c*), en el caso de CDIT, se recoge en la *Figura 32*.

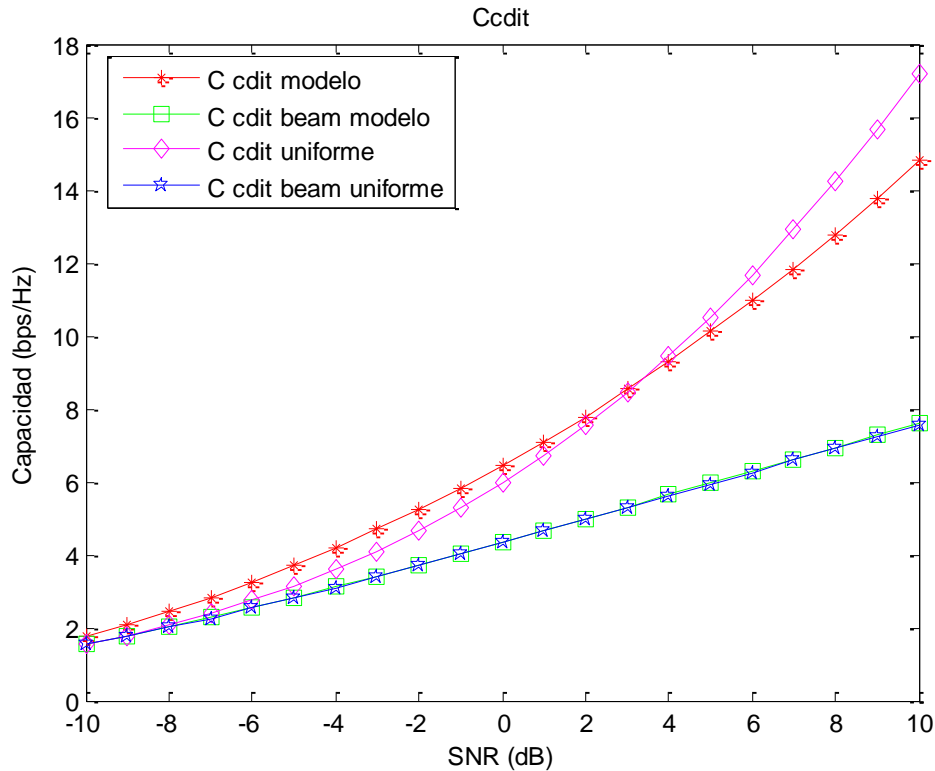


Figura 32: Capacidad CDIT para dispersión angular c) con $M=N=6$

Siguiendo con la inercia, cada vez es mejor el reparto de potencia cuando no se usa BF que cuando se usa, ya que cada vez predomina a SNR más baja el no utilizar BF. Como hemos aumentado de 4 a 6 el número de antenas, la capacidad ha aumentado ostensiblemente con respecto al cambio de 3 a 4 antenas, como es de esperar, como consecuencia de que, al aumentar el número de antenas, cada vez aumenta de una forma más rápida la capacidad. En la *Tabla 34* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCDIT modelo (bps/Hz)	CCDIT BF modelo (bps/Hz)	CCDIT uniforme (bps/Hz)	CCDIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	1.7668	1.5545	1.5416	1.5364
-5	3.7046	2.8331	3.1429	2.8095
0	6.4284	4.3485	5.9555	4.3224
5	10.1147	5.9602	10.5107	5.9332
10	14.8222	7.6053	17.1823	7.5779

Tabla 34: valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular c) con $M=N=6$

5.2.3.3.2 CSIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la Figura 7c), en el caso de CSIT, se recoge en la Figura 33.

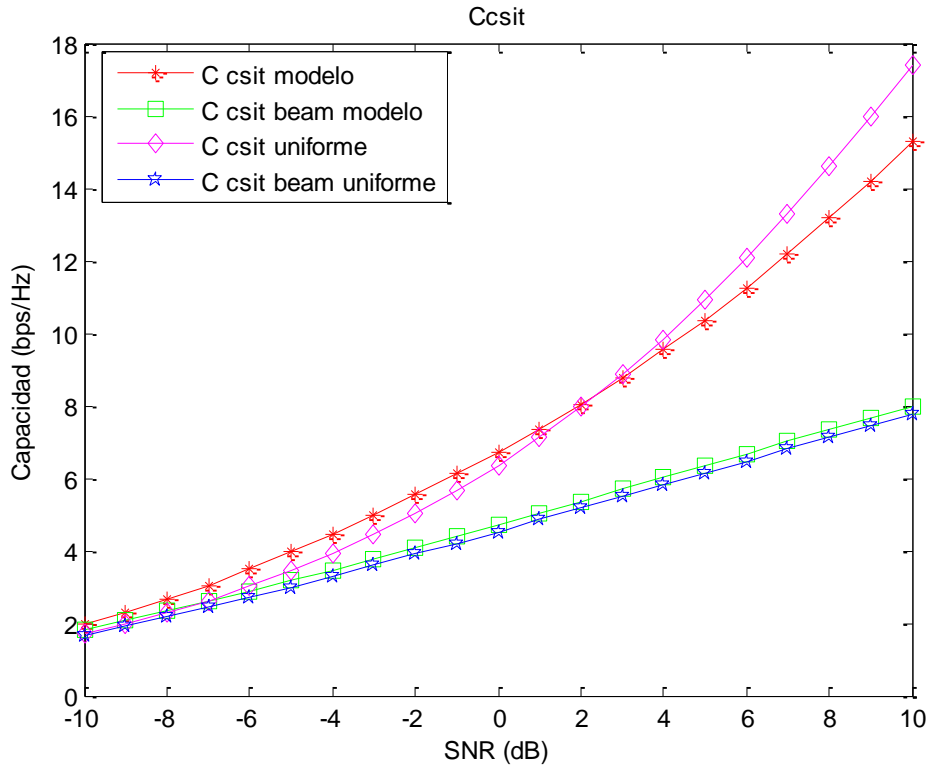


Figura 33: Capacidad CSIT para dispersión angular c) con $M=N=6$

Para el caso de CSIT, valen los mismos comentarios que para el caso de CDIT, siendo los valores de capacidad en CSIT mayores que para el caso CDIT, como han sido siendo a lo largo de todas las simulaciones. En la Tabla 35 podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCSIT modelo (bps/Hz)	CCSIT BF modelo (bps/Hz)	CCSIT uniforme (bps/Hz)	CCSIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	1.9523	1.8215	1.6964	1.6781
-5	3.9572	3.1723	3.4356	2.9923
0	6.7000	4.7195	6.3645	4.5237
5	10.3605	6.3425	10.9074	6.1411
10	15.3044	7.9913	17.3848	7.7880

Tabla 35: valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular c) con $M=N=6$

5.2.3.3.3 Sin información del canal en el transmisor

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la Figura 7c), en el caso de que no tengamos información del canal, se recoge en la Figura 34.

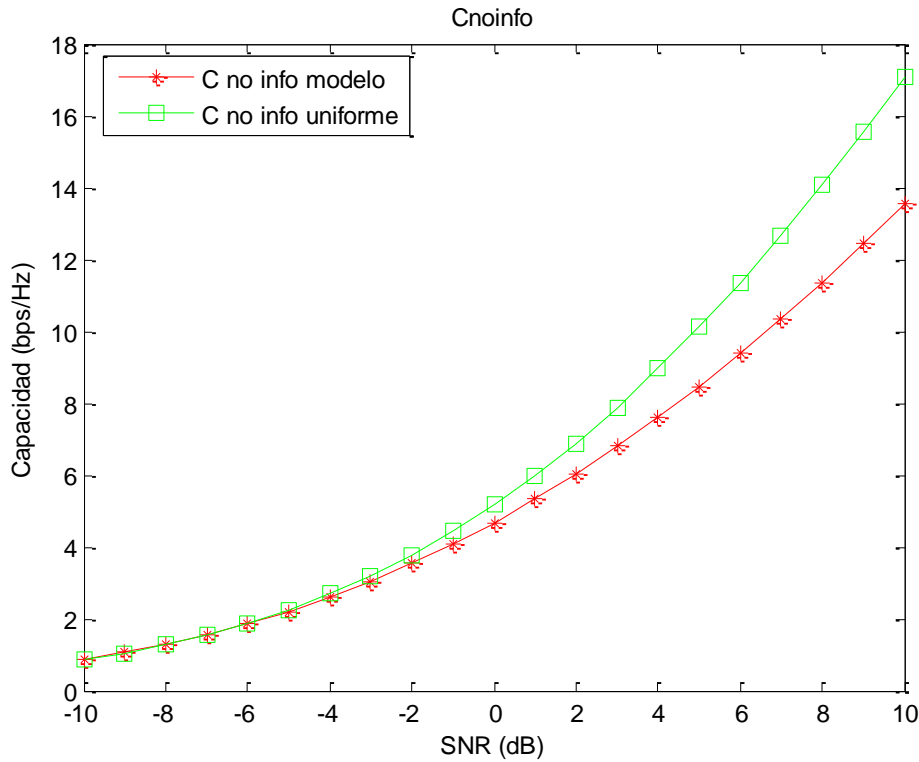


Figura 34: Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular c) con $M=N=6$

Obtenemos un resultado similar al caso de $M=N=4$, pero con un aumento de la capacidad debido al aumento del número de antenas. La capacidad sigue siendo menor en este caso que en los dos anteriores. En la Tabla 36 podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	C no info modelo (bps/Hz)	C no info uniforme (bps/Hz)
-10	0.8630	0.8434
-5	2.1952	2.2499
0	4.6799	5.1696
5	8.4619	10.1029
10	13.5663	17.0833

Tabla 36: valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular c) con $M=N=6$

5.2.4 Dispersión angular d)

En este apartado, vamos a realizar las simulaciones con la dispersión angular que aparece en la *Figura 7d*), exponiéndose a continuación los resultados obtenidos.

5.2.4.1 M=N=3

En el caso de que tengamos tres antenas tanto en el transmisor como en el receptor, los autovalores de la matriz \mathbf{H} vienen reflejados en la *Tabla 37*.

\mathbf{H} uniforme	2.0357	1.3207	0.3382
\mathbf{H} modelo	2.3133	0.9744	0.1828

Tabla 37: autovalores de la matriz \mathbf{H} para dispersión angular d) con $M=N=3$

Obtenemos dos modos activos para cada uno de los casos. Con esta dispersión angular, viendo que es visiblemente menos amplia que las anteriores, podemos prever que los modos van a ir decreciendo en el caso del modelo, como consecuencia de tener una mayor correlación, que se corresponde con una menor dispersión. En el caso que nos ocupa, todavía no se ve esa disminución de los modos para comprobar que lo dicho anteriormente es cierto, tendremos que esperar a los casos de $M=N=4$ o $M=N=6$ para ver si estamos en lo cierto, ya que con tres antenas transmisoras y receptoras es muy difícil ver que los modos disminuyan.

5.2.4.1.1 CDIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7d*), en el caso de CDIT, se recoge en la *Figura 35*.

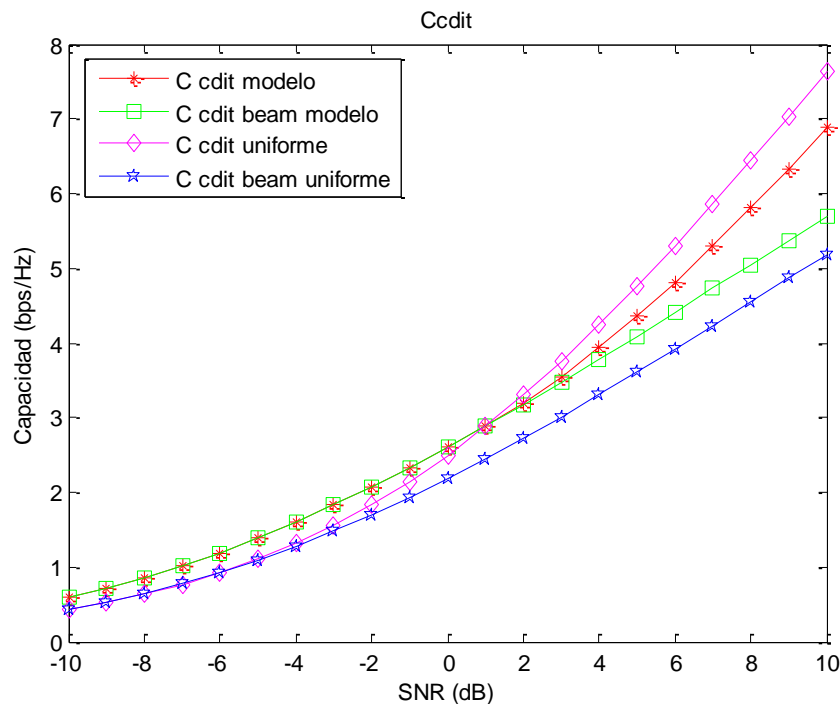


Figura 35: Capacidad CDIT para dispersión angular d) con $M=N=3$

Para este caso, como puede observarse, el modelo predomina sobre el caso uniforme hasta un valor de SNR de 0 dB. Una de las consecuencias puede ser que la dispersión angular es menos amplia, por lo que habrá que ver si sigue esta senda y no pasa como en la dispersión angular anterior, que solo era mejor el modelo con respecto al caso uniforme debido a que el número de antenas no era lo suficientemente grande, para después volver a que el caso uniforme era mejor desde SNR muy bajas. En la *Tabla 38* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCDIT modelo (bps/Hz)	CCDIT BF modelo (bps/Hz)	CCDIT uniforme (bps/Hz)	CCDIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	0.5925	0.5925	0.4380	0.4383
-5	1.3819	1.3819	1.1019	1.0860
0	2.6030	2.6038	2.4963	2.1860
5	4.3524	4.0926	4.7632	3.6121
10	6.8976	5.6946	7.6421	5.1900

Tabla 38: valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular d) con $M=N=3$

5.2.4.1.2 CSIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7d*), en el caso de CSIT, se recoge en la *Figura 36*.

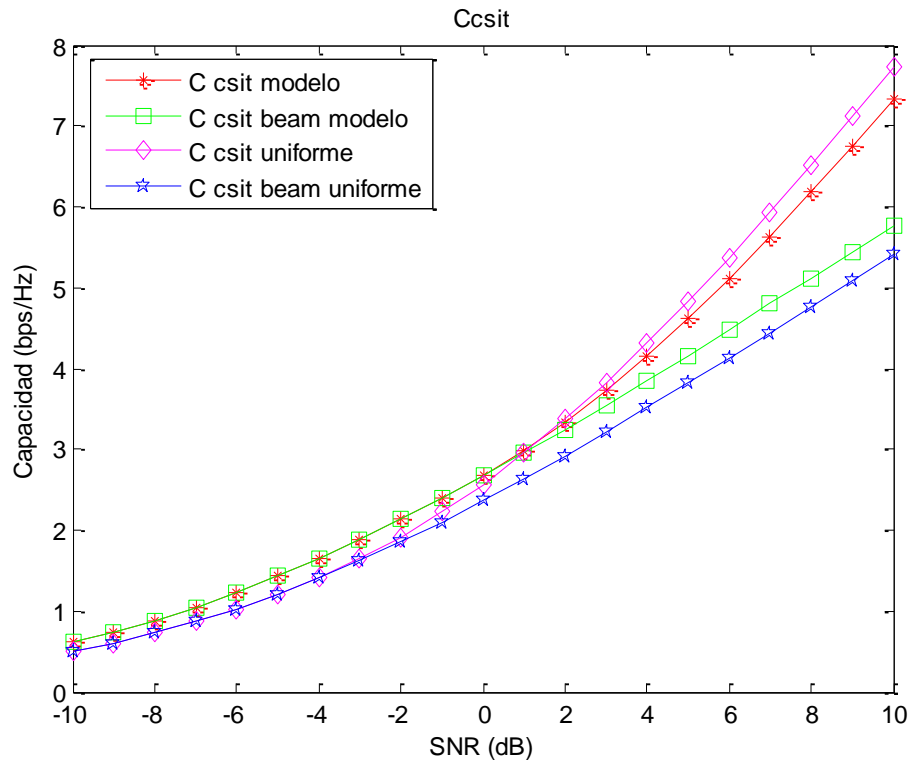


Figura 36: Capacidad CSIT para dispersión angular d) con $M=N=3$

El caso de CSIT es muy parecido al de CDIT. En la *Tabla 39* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCSIT modelo (bps/Hz)	CCSIT BF modelo (bps/Hz)	CCSIT uniforme (bps/Hz)	CCSIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	0.6184	0.6184	0.5002	0.5002
-5	1.4288	1.4288	1.2082	1.6215
0	2.6722	2.6671	2.5730	2.3629
5	4.6217	4.1637	4.8369	3.8181
10	7.3263	5.7686	7.7234	5.4074

Tabla 39: valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular d) con $M=N=3$

5.2.4.1.3 Sin información del canal en el transmisor

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7d*), en el caso de que no tengamos información del canal, se recoge en la *Figura 37*.

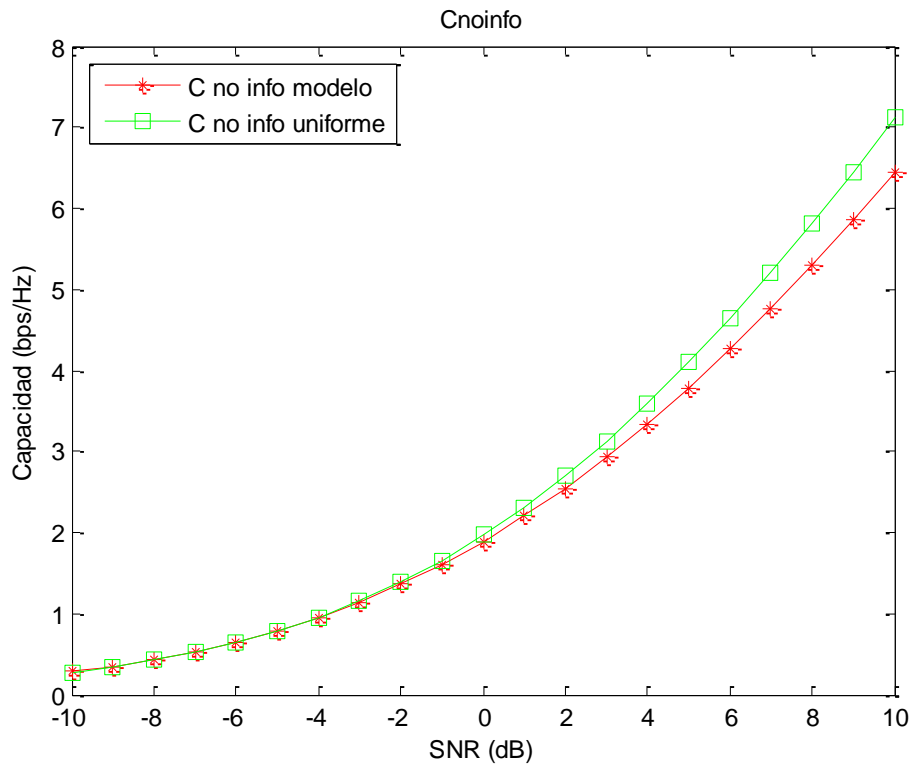


Figura 37: Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular d) con $M=N=3$

Al igual que ocurre en CDIT y CSIT, en el caso de no tener información del canal en el transmisor, el modelo predomina sobre el caso uniforme hasta el valor de SNR de 0 dB, viendo así el paralelismo existente. Como es lógico, el valor de la capacidad en este caso es el menor de los 3. En la *Tabla 40* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	C no info modelo (bps/Hz)	C no info uniforme (bps/Hz)
-10	0.2834	0.2737
-5	0.7881	0.7837
0	1.8899	1.9669
5	3.7824	4.0938
10	6.4478	7.1232

Tabla 40: valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular d con $M=N=3$

5.2.4.2 M=N=4

En el caso de que tengamos cuatro antenas tanto en el transmisor como en el receptor, los autovalores de la matriz \mathbf{H} vienen reflejados en la *Tabla 41*.

\mathbf{H} uniforme	2.9577	2.2460	1.5884	0.1093
\mathbf{H} modelo	3.2108	1.2562	0.3294	0.0484

Tabla 41: autovalores de la matriz \mathbf{H} para dispersión angular $d)$ con $M=N=4$

Como puede verse, para el caso uniforme tenemos tres modos de potencia activos mientras que, para el modelo, tenemos dos modos dominantes. Al igual que ocurría en el caso de $M=N=3$ este número de antenas todavía no es suficiente para ver un cambio en cuanto a los modos como consecuencia de utilizar cada vez una dispersión menos dispersa, así que tendremos que esperar al caso de $M=N=6$ para observar el cambio de una manera significativa.

5.2.4.2.1 CDIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7d)*, en el caso de CDIT, se recoge en la *Figura 38*.

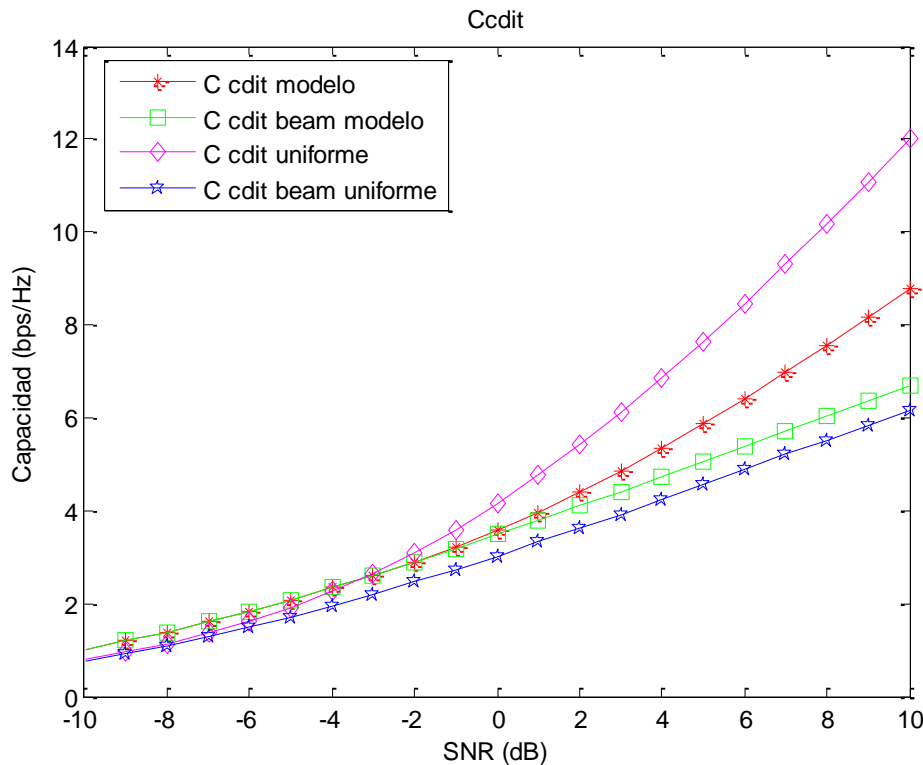


Figura 38: Capacidad CDIT para dispersión angular $d)$ con $M=N=4$

Como se observa, en este caso, al contrario que para la dispersión angular anterior, al ser esta dispersión menos amplia, en frecuencias bajas sigue continuando el predominio del modelo, aumentando la SNR a la cual predomina el caso uniforme con respecto a la dispersión angular anterior. En el caso de $M=N=6$ como se verá a continuación, la tendencia vista en la *Figura 38* se hará más evidente. En la *Tabla 42*

podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCDIT modelo (bps/Hz)	CCDIT BF modelo (bps/Hz)	CCDIT uniforme (bps/Hz)	CCDIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	1.0159	1.0159	0.7878	0.7769
-5	2.0815	2.0815	1.9208	1.7032
0	3.5733	3.4882	4.1481	3.0241
5	5.8739	5.0585	7.6455	4.5584
10	8.7792	6.6895	12.0072	6.1769

Tabla 42: valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular $d)$ con $M=N=4$

5.2.4.2.2 CSIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7d)*, en el caso de CSIT, se recoge en la *Figura 39*.

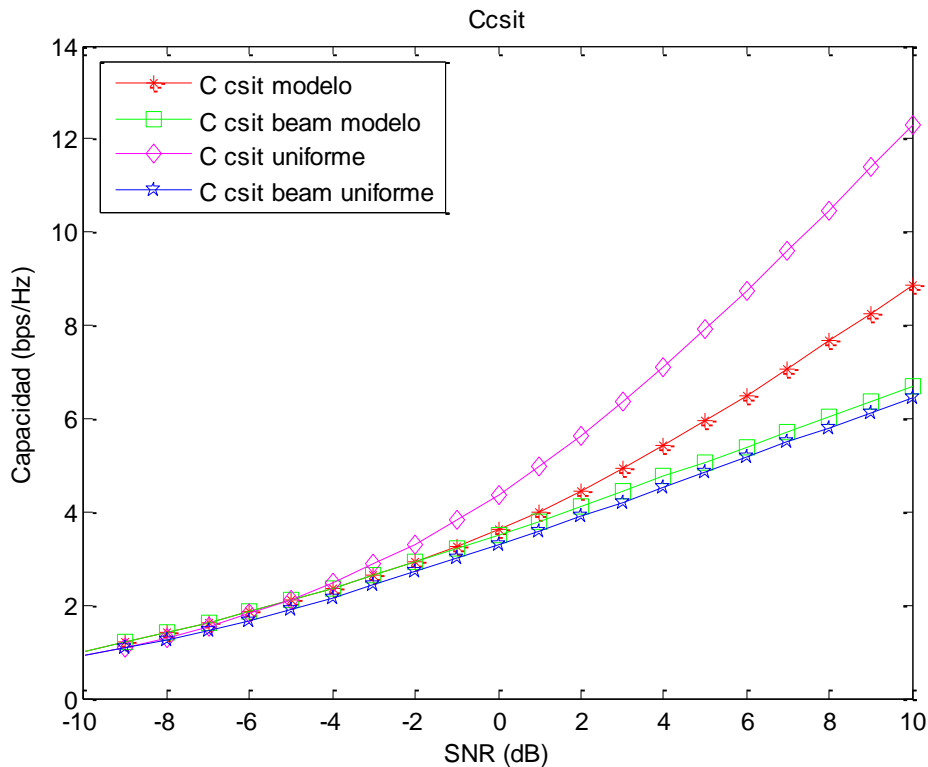


Figura 39: Capacidad CSIT para dispersión angular $d)$ con $M=N=4$

Como ha ido ocurriendo, este caso es muy parecido al caso CDIT, por lo que los comentarios son los mismos, salvo que existe una mayor capacidad en este caso. En la *Tabla 43* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCSIT modelo (bps/Hz)	CCSIT BF modelo (bps/Hz)	CCSIT uniforme (bps/Hz)	CCSIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	1.0221	1.0221	0.9089	0.9067
-5	2.0909	2.0909	2.1249	1.9131
0	3.6067	3.4994	4.3631	3.2851
5	5.9457	5.0704	7.9022	4.8411
10	8.8713	6.7017	12.3061	6.4673

Tabla 43: valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular d) con $M=N=4$

5.2.4.2.3 Sin información del canal en el transmisor

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la Figura 7d), en el caso de que no tengamos información del canal, se recoge en la Figura 37.

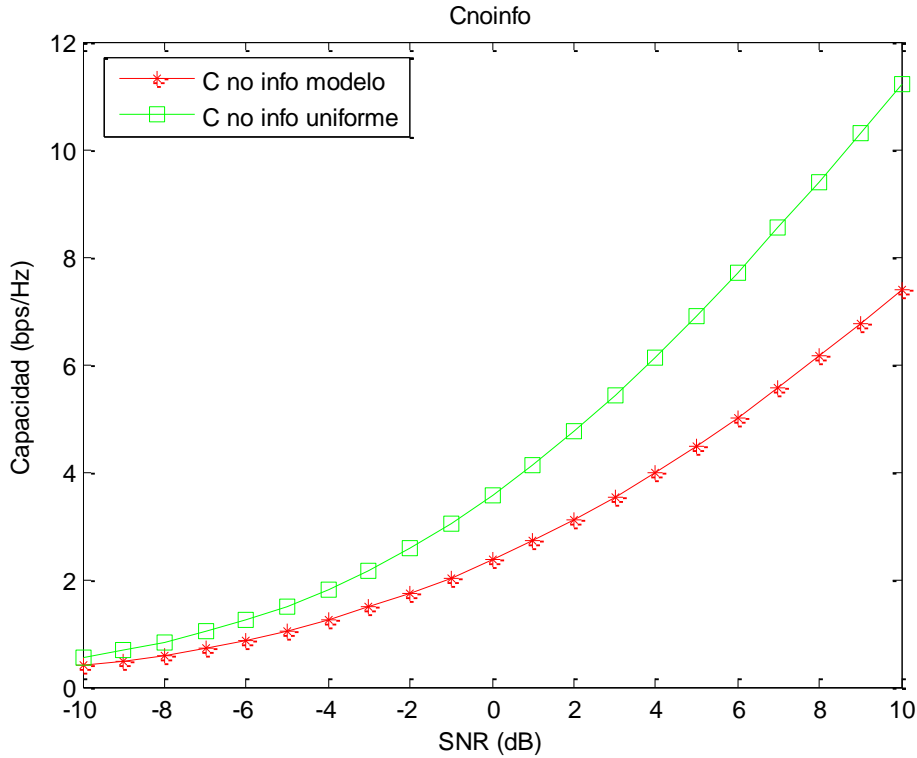


Figura 40: Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular d) con $M=N=4$

En este caso, desde SNR muy bajas el caso uniforme es mejor que el modelo, siendo una de las posibles consecuencias que tenemos un total desconocimiento del canal en el transmisor, lo que hace que, en algunos casos, salgan resultados un poco distintos, lo cual no quiere decir incorrectos, a los resultados obtenidos anteriormente. Se sigue observando que este caso es el caso que menor capacidad consigue. En la Tabla 44 podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	C no info modelo (bps/Hz)	C no info uniforme (bps/Hz)
-10	0.3906	0.5454
-5	1.0422	1.5063
0	2.3581	3.5590
5	4.4835	6.8991
10	7.4034	11.1939

Tabla 44: valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular d) con $M=N=4$

5.2.4.3 M=N=6

En el caso de que tengamos seis antenas tanto en el transmisor como en el receptor, los autovalores de la matriz \mathbf{H} vienen reflejados en la *Tabla 45*.

\mathbf{H} uniforme	4.7562	2.6990	2.4758	1.5231	0.7342	0.5032
\mathbf{H} modelo	5.9365	3.0777	1.3376	0.1183	0.0620	0.0139

Tabla 45: autovalores de la matriz \mathbf{H} para dispersión angular $d)$ con $M=N=6$

En los anteriores casos, es decir, para $M=N=3$ y $M=N=4$ se comentó que, como la dispersión angular a estudiar en este apartado es menos amplia que las anteriores, se debería ver una reducción de los modos para el modelo, como consecuencia de una mayor correlación. En dichos casos anteriores no se vio de una manera clara la disminución de los modos, mientras que, como puede verse en la *Tabla 45*, en el caso uniforme obtenemos cinco modos de potencia activos con un posible sexto modo, obteniendo en el caso de la uniforme tres modos dominantes, viendo así como a medida que la dispersión es menos amplia, es decir, tiene más correlación, los modos del modelo van a ser de menor cantidad, como es lógico, ya que la potencia nos llega desde menos lugares y, por tanto, el reparto de potencia va a ser en menos modos.

5.2.4.3.1 CDIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7d)*, en el caso de CDIT, se recoge en la *Figura 41*.

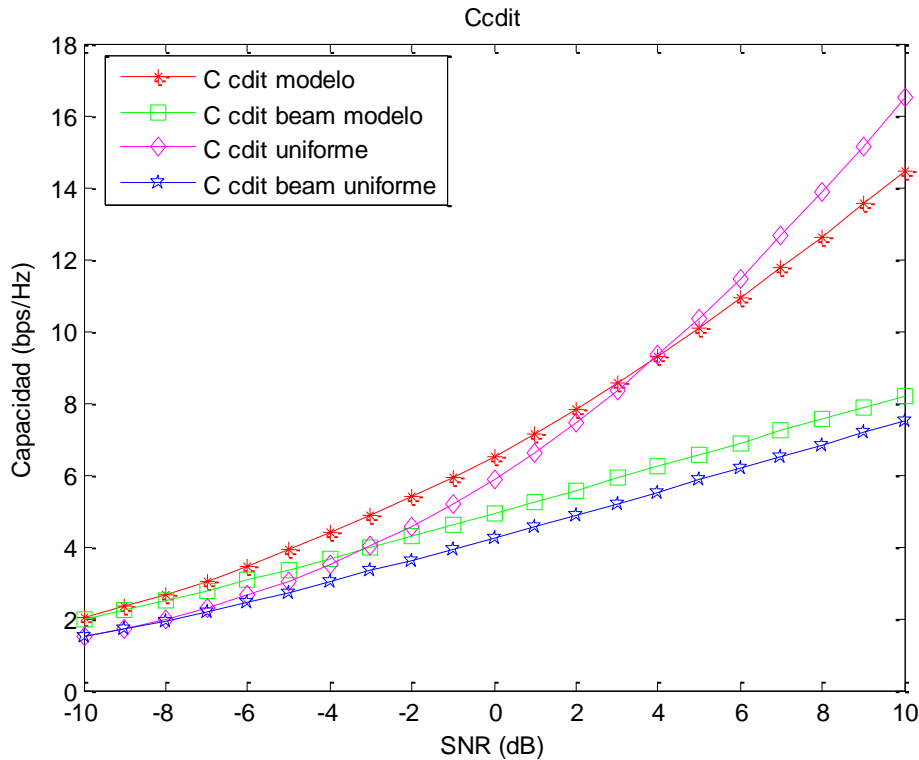


Figura 41: Capacidad CDIT para dispersión angular $d)$ con $M=N=6$

Como puede observarse, según lo comentado en los casos de $M=N=3$ y $M=N=4$, el caso uniforme cada vez va siendo mejor que el modelo en un valor de SNR

estable, es decir, no decrece dicho valor tan rápidamente como cuando se utilizaban las demás dispersiones angulares, siendo la consecuencia de ello el ser la dispersión que estamos simulando menos amplia que las demás. En la *Tabla 46* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCDIT modelo (bps/Hz)	CCDIT BF modelo (bps/Hz)	CCDIT uniforme (bps/Hz)	CCDIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	2.0239	1.9805	1.4792	1.4811
-5	3.8979	3.3669	3.0421	2.7367
0	6.5245	4.9290	5.8665	4.2415
5	10.0769	6.5572	10.3637	5.8494
10	14.4444	8.2076	16.4874	7.4931

Tabla 46: valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular d) con $M=N=6$

Comparando los resultados de esta dispersión angular con las demás observamos que, a medida que la dispersión angular es menos amplia, la diferencia de tener más antenas se va haciendo menor en el caso uniforme mientras que, en el caso de utilizar BF, dicha diferencia va aumentando poco a poco, como consecuencia de que la dispersión angular sea menos dispersiva, lo que hace que exista más correlación y, por tanto, el BF mejore.

5.2.4.3.2 CSIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7d*), en el caso de CSIT, se recoge en la *Figura 42*.

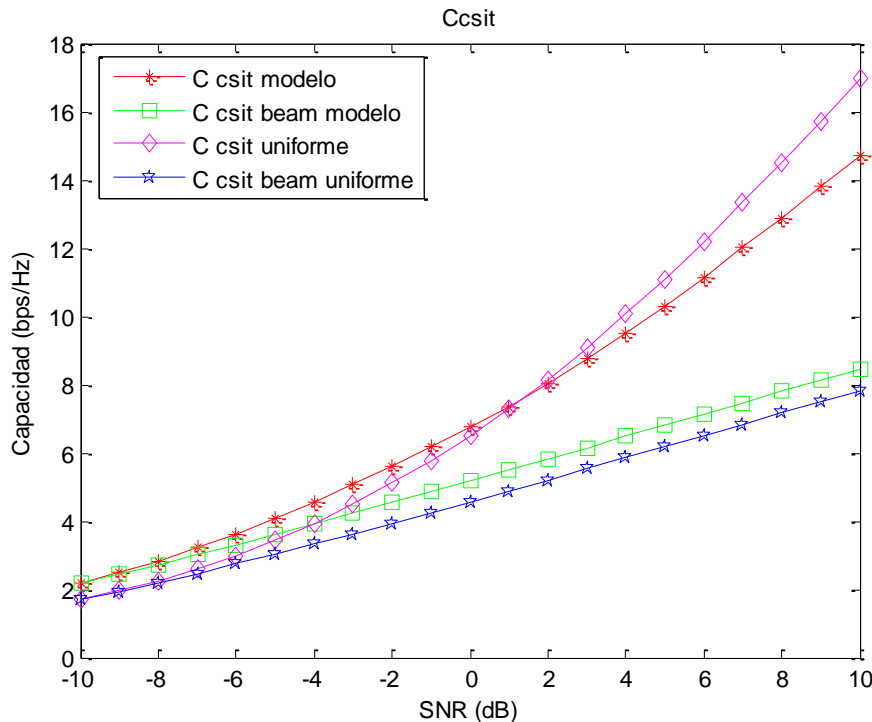


Figura 42: Capacidad CSIT para dispersión angular d) con $M=N=6$

El caso de CSIT es similar al de CDIT, por lo que los comentarios acerca de lo que ocurre son los mismos que para CSIT, existiendo, como siempre, una mayor capacidad en CSIT. En la *Tabla 47* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCSIT modelo (bps/Hz)	CCSIT BF modelo (bps/Hz)	CCSIT uniforme (bps/Hz)	CCSIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	2.1914	2.1777	1.7067	1.7058
-5	4.0800	3.6022	3.4325	3.0274
0	6.7457	5.1796	6.5078	4.5620
5	10.3076	6.8131	11.1041	6.1806
10	14.7230	8.4652	16.9875	7.8279

Tabla 47: valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular d) con $M=N=6$

5.2.4.3.3 Sin información del canal en el transmisor

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7d*), en el caso de que no tengamos información del canal, se recoge en la *Figura 43*.

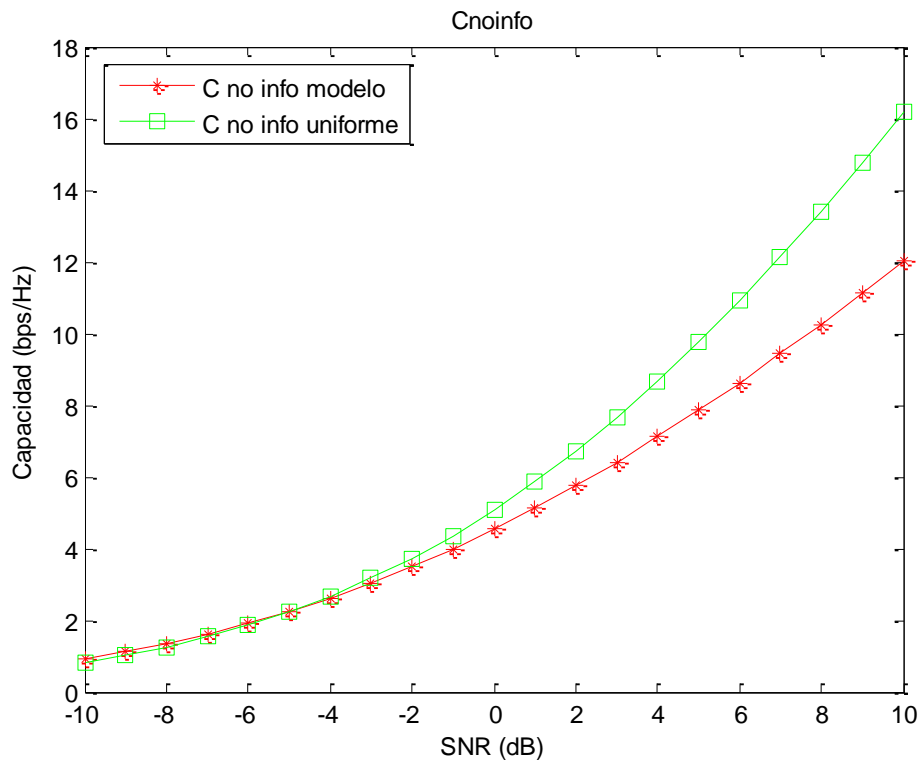


Figura 43: Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular d) con $M=N=6$

En este caso es similar al caso de $M=N=4$, variando únicamente en que existe una mayor capacidad, pero sigue siendo menor que para los casos de CDIT y CSIT. En la *Tabla 48* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	C no info modelo (bps/Hz)	C no info uniforme (bps/Hz)
-10	0.9209	0.8409
-5	2.2303	2.2310
0	4.5286	5.0716
5	7.8459	9.7412
10	12.0062	16.1934

Tabla 48: valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular d) con $M=N=6$

5.2.5 Dispersión angular e)

En este apartado, vamos a realizar las simulaciones con la dispersión angular que aparece en la *Figura 7e*), exponiéndose a continuación los resultados obtenidos.

5.2.5.1 M=N=3

En el caso de que tengamos tres antenas tanto en el transmisor como en el receptor, los autovalores de la matriz \mathbf{H} vienen reflejados en la *Tabla 49*.

\mathbf{H} uniforme	2.5030	1.1587	0.5131
\mathbf{H} modelo	2.8588	0.9147	0.0768

Tabla 49: autovalores de la matriz \mathbf{H} para dispersión angular e) con $M=N=3$

Esta dispersión angular es menos amplia que la anterior, por lo que se debería ver como los modos del modelo van siendo cada vez menores, pero, como ya se dijo anteriormente, para valores de antenas transmisoras y receptoras de 3 y 4, no se va a observar un gran cambio. Existen 2 modos de potencia activa en cada caso, con un posible tercer modo en el caso uniforme.

5.2.5.1.1 CDIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7e*), en el caso de CDIT, se recoge en la *Figura 44*.

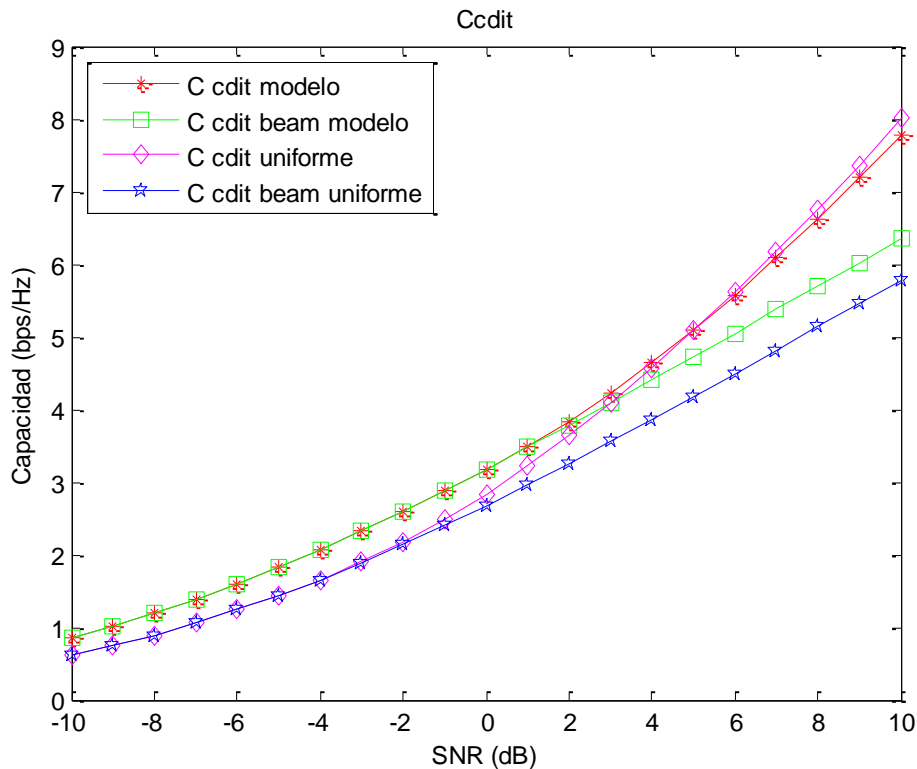


Figura 44: Capacidad CDIT para dispersión angular e) con $M=N=3$

En la *Figura 44* se puede ver como la tendencia que se comentó anteriormente se va cumpliendo, es decir, a medida que utilizamos una dispersión angular menos amplia, el valor de la capacidad del modelo tanto para cuando no se usa BF como para cuando se usa predomina por encima del caso uniforme durante más rango de SNR, llegando en este caso a un valor de 3 dB. En la *Tabla 50* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCDIT modelo (bps/Hz)	CCDIT BF modelo (bps/Hz)	CCDIT uniforme (bps/Hz)	CCDIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	0.8521	0.8521	0.6233	0.6233
-5	1.8262	1.8262	1.4366	1.4376
0	3.1769	3.1781	2.8392	2.6789
5	5.0887	4.7257	5.0796	4.1769
10	7.7632	6.3489	8.0066	5.7823

Tabla 50: valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular $e)$ con $M=N=3$

5.2.5.1.2 CSIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7e)*, en el caso de CSIT, se recoge en la *Figura 45*. Como se observa, es prácticamente idéntica al caso CDIT, por lo que las valoraciones de la misma son idénticas, existiendo una ínfima diferencia en cuanto a la capacidad entre los dos casos a favor de CSIT.

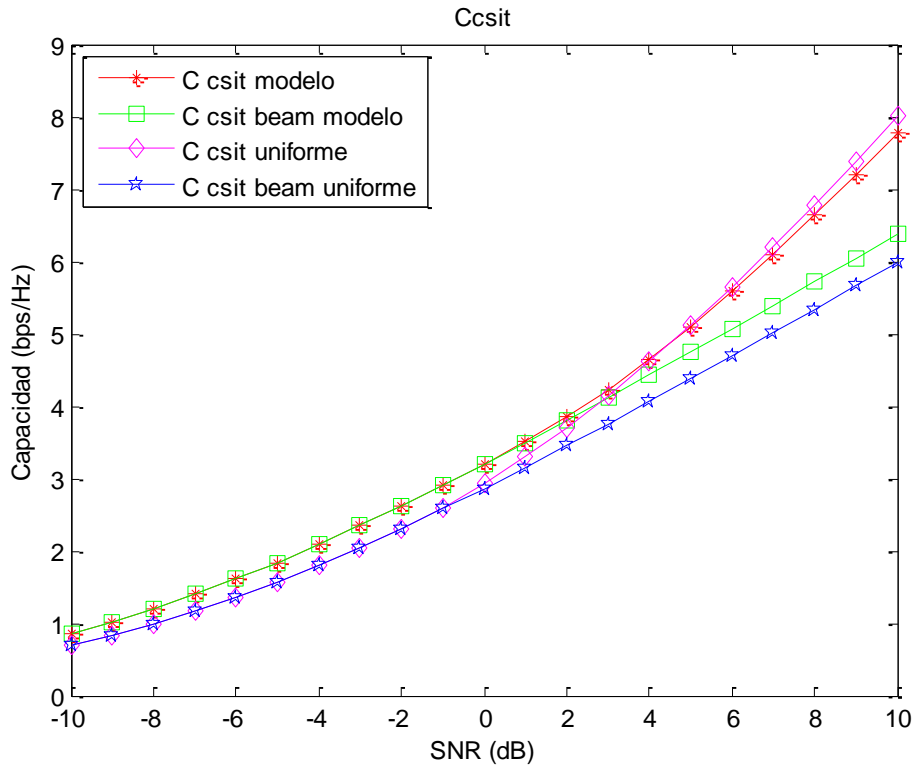


Figura 45: Capacidad CSIT para dispersión angular $e)$ con $M=N=3$

En la *Tabla 51* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCSIT modelo (bps/Hz)	CCSIT BF modelo (bps/Hz)	CCSIT uniforme (bps/Hz)	CCSIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	0.8618	0.8618	0.7018	0.7018
-5	1.8417	1.8417	1.5759	1.5759
0	3.1973	3.1973	2.9311	2.8610
5	5.1004	4.7465	5.1201	4.3793
10	7.7745	6.3703	8.0262	5.9921

Tabla 51: valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular e) con $M=N=3$

5.2.5.1.3 Sin información del canal en el transmisor

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7e)*, en el caso de que no tengamos información del canal, se recoge en la *Figura 46*.

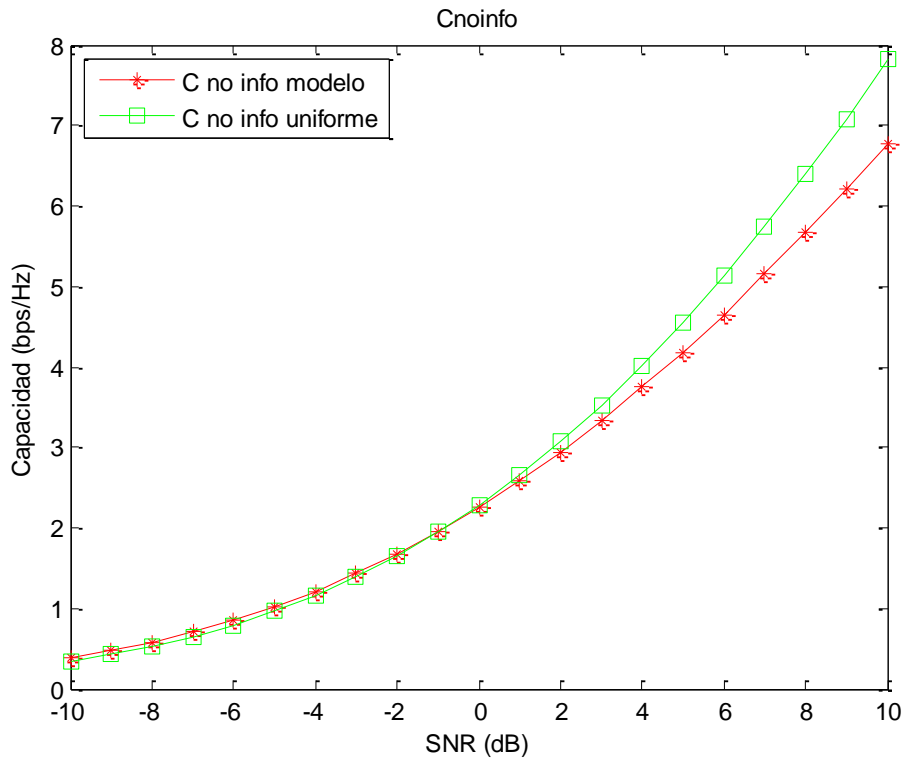


Figura 46: Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular e) con $M=N=3$

Como en las anteriores dispersiones, en el caso de no tener información del canal en el transmisor hace que la capacidad sea menor que en los casos de CDIT y CSIT, ya que el reparto de potencia nunca podrá ser el óptimo, aunque se acerque. En la *Tabla 52* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	C no info modelo (bps/Hz)	C no info uniforme (bps/Hz)
-10	0.3875	0.3494
-5	1.0193	0.9620
0	2.2546	2.2818
5	4.1864	4.5523
10	6.7696	7.8137

Tabla 52: valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular e) con $M=N=3$

5.2.5.2 M=N=4

En el caso de que tengamos 4 antenas tanto en el transmisor como en el receptor, los autovalores de la matriz \mathbf{H} vienen reflejados en la *Tabla 53*.

\mathbf{H} uniforme	2.9900	2.6589	1.0765	0.4654
\mathbf{H} modelo	4.2701	0.7373	0.3443	0.0479

Tabla 53: autovalores de la matriz \mathbf{H} para dispersión angular e) con $M=N=4$

En este caso, nos encontramos con que, para $M=N=4$ sí que se empieza a ver cómo los modos de potencia del modelo disminuyen, siendo en este caso dos modos los dominantes, mientras que para el caso uniforme tenemos tres modos activos con un posible cuarto. Que la dispersión sea menos amplia en este caso sí que se hace notar ya, no como en el caso anterior, que hasta que no utilizábamos seis antenas tanto en transmisión como en recepción no se notaba el cambio.

5.2.5.2.1 CDIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7e*), en el caso de CDIT, se recoge en la *Figura 47*.

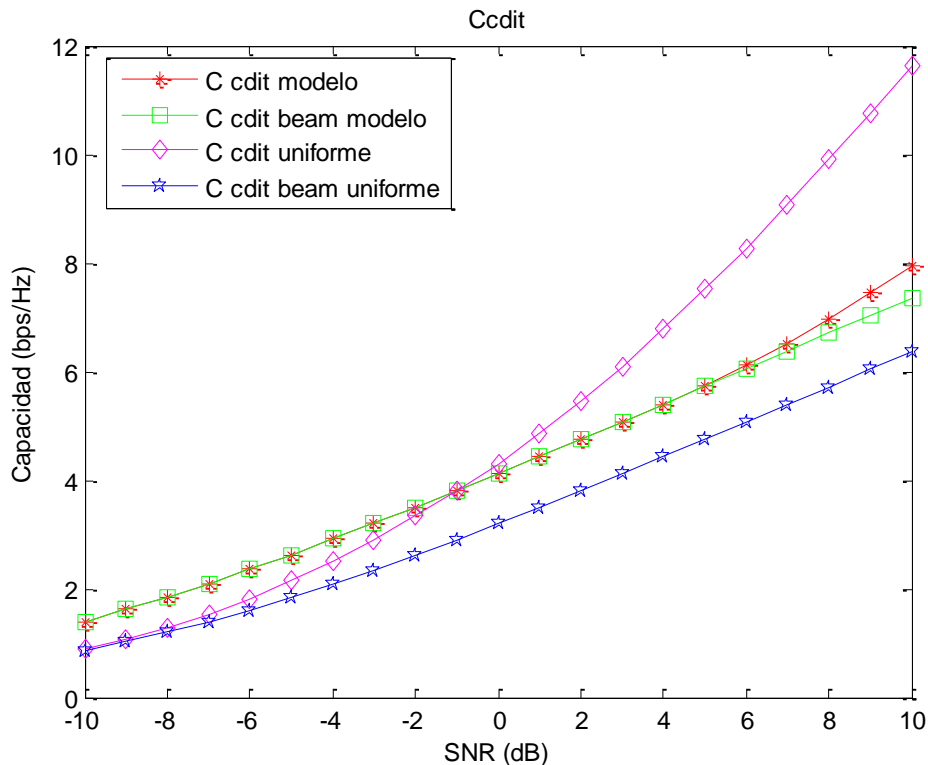


Figura 47: Capacidad CDIT para dispersión angular e) con $M=N=4$

Como se observa en la *Figura 47*, se sigue el mismo camino que se comentó para $M=N=3$, ya que cada vez el modelo es más efectivo que el caso uniforme durante un mayor rango. En el caso de la anterior dispersión angular, el cambio ocurría en una SNR de -3 dB mientras que, con esta dispersión angular, obtenemos un valor de SNR de -1dB, observándose así la mejoría que se dijo anteriormente. En la *Tabla 54* podemos

observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCDIT modelo (bps/Hz)	CCDIT BF modelo (bps/Hz)	CCDIT uniforme (bps/Hz)	CCDIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	1.4008	1.4008	0.8841	0.8603
-5	2.6295	2.6295	2.1411	1.8394
0	4.1215	4.1215	4.3079	3.1945
5	5.7355	5.7246	7.5118	4.7434
10	7.9456	7.3668	11.6401	6.3671

Tabla 54: valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular e) con $M=N=4$

5.2.5.2.2 CSIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la Figura 7e), en el caso de CSIT, se recoge en la Figura 48.

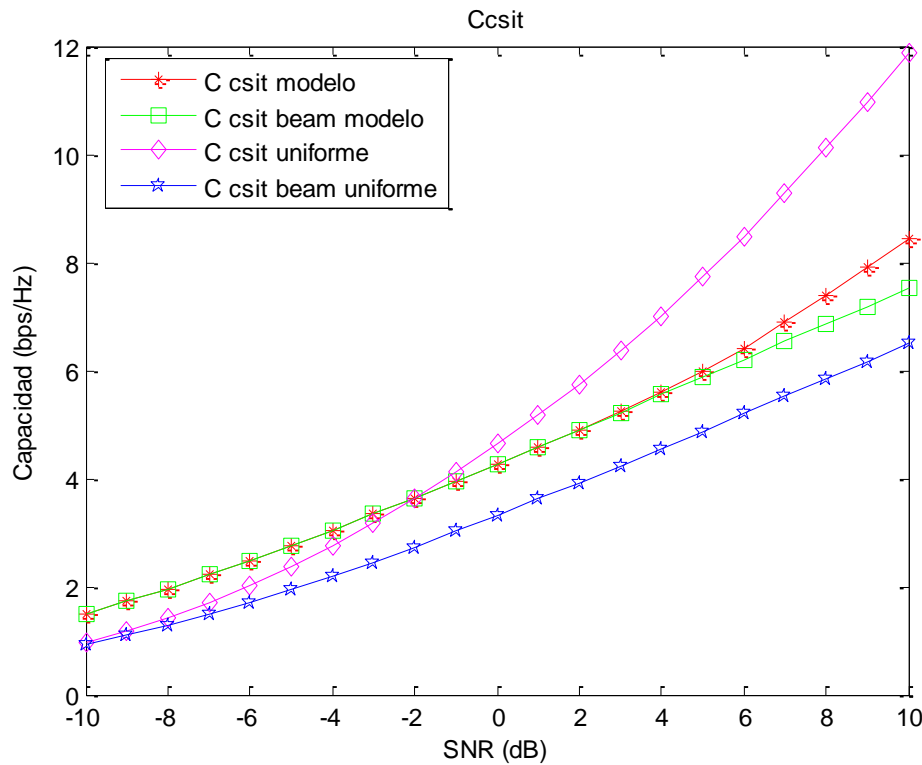


Figura 48: Capacidad CSIT para dispersión angular e) con $M=N=4$

Para el caso de CSIT se observa como en anteriores simulaciones que se obtienen resultados parecidos a los del caso CDIT, existiendo, eso sí, una mayor capacidad en el caso de CSIT. En la Tabla 55 podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCSIT modelo (bps/Hz)	CCSIT BF modelo (bps/Hz)	CCSIT uniforme (bps/Hz)	CCSIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	1.4974	1.4974	0.9799	0.9214
-5	2.7583	2.7583	2.3576	4.8714
0	4.2656	4.2656	4.6334	3.3132
5	5.9856	5.8743	7.7310	4.3793
10	8.4537	7.5184	11.8634	6.4982

Tabla 55: valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular e) con $M=N=4$

5.2.5.2.3 Sin información del canal en el transmisor

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la Figura 7e), en el caso de que no tengamos información del canal, se recoge en la Figura 49.

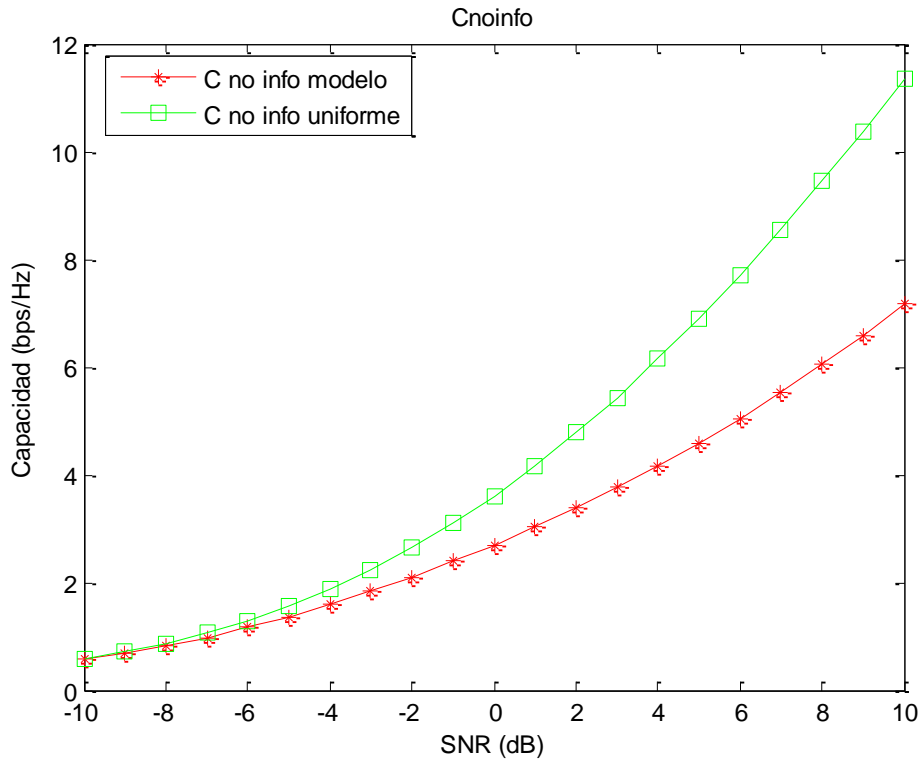


Figura 49: Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular e) con $M=N=4$

Al no tener información acerca del canal en el transmisor, como ya ocurriese anteriormente, pueden existir simulaciones en los que salgan resultados parecidos a los de los otros dos casos, pero no exactamente con el mismo cauce que los mismos, siendo esto mismo lógico ya que, en los otros dos casos, sí que se tiene información del canal, ya sea total o parcial. En la Tabla 56 podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	C no info modelo (bps/Hz)	C no info uniforme (bps/Hz)
-10	0.5657	0.5748
-5	1.3622	1.5627
0	2.7015	3.6054
5	4.5940	6.8984
10	7.1628	11.3550

Tabla 56: valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular e) con $M=N=4$

5.2.5.3 M=N=6

En el caso de que tengamos seis antenas tanto en el transmisor como en el receptor, los autovalores de la matriz \mathbf{H} vienen reflejados en la *Tabla 57*.

\mathbf{H} uniforme	4.7748	2.3202	1.9041	1.2282	0.6992	0.4727
\mathbf{H} modelo	5.2635	2.3026	1.4150	0.2743	0.1719	0.1011

Tabla 57: autovalores de la matriz \mathbf{H} para dispersión angular e) con $M=N=6$

Como se comentó anteriormente, se puede observar en la *Tabla 57* que los modos a medida que la dispersión angular se vuelve menos amplia, es decir, existe más correlación, los modos de potencia del modelo van disminuyendo. En el caso uniforme nos encontramos con cinco modos activos y un posible sexto mientras que, para el modelo, obtenemos tres modos dominantes, siguiendo la línea que se comentó para la dispersión angular anterior.

5.2.5.3.1 CDIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7e*), en el caso de CDIT, se recoge en la *Figura 50*.

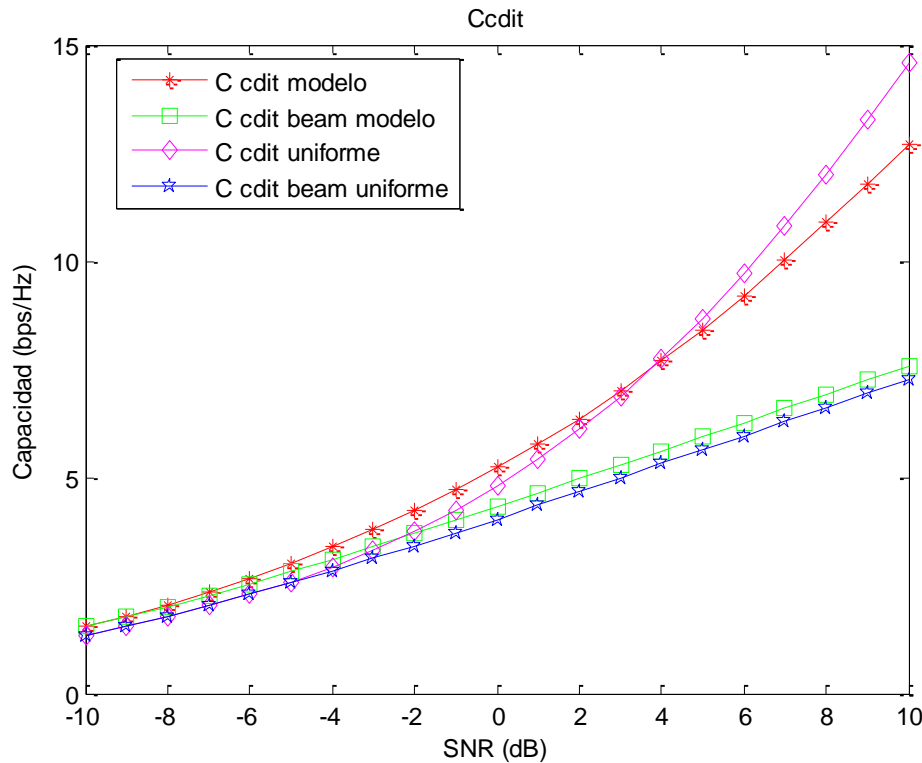


Figura 50: Capacidad CDIT para dispersión angular e) con $M=N=6$

Observando en la *Figura 50* que se sigue cumpliendo lo dicho para los casos de $M=N=3$ y $M=N=4$. También se puede comentar que, como se dijo anteriormente, a medida que utilizamos una dispersión angular menos amplia, la diferencia en el valor de capacidad al aumentar el número de antenas para el caso uniforme disminuye. En la *Tabla 58* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCDIT modelo (bps/Hz)	CCDIT BF modelo (bps/Hz)	CCDIT uniforme (bps/Hz)	CCDIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	1.5369	1.5370	1.3438	1.3442
-5	3.0088	2.8103	2.5875	2.5524
0	5.2200	4.3233	4.7955	4.0346
5	8.4145	5.9341	8.6766	5.6341
10	12.6939	7.5788	14.5876	7.2750

Tabla 58: valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular e) con $M=N=6$

5.2.5.3.2 CSIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la Figura 7e), en el caso de CSIT, se recoge en la Figura 51.

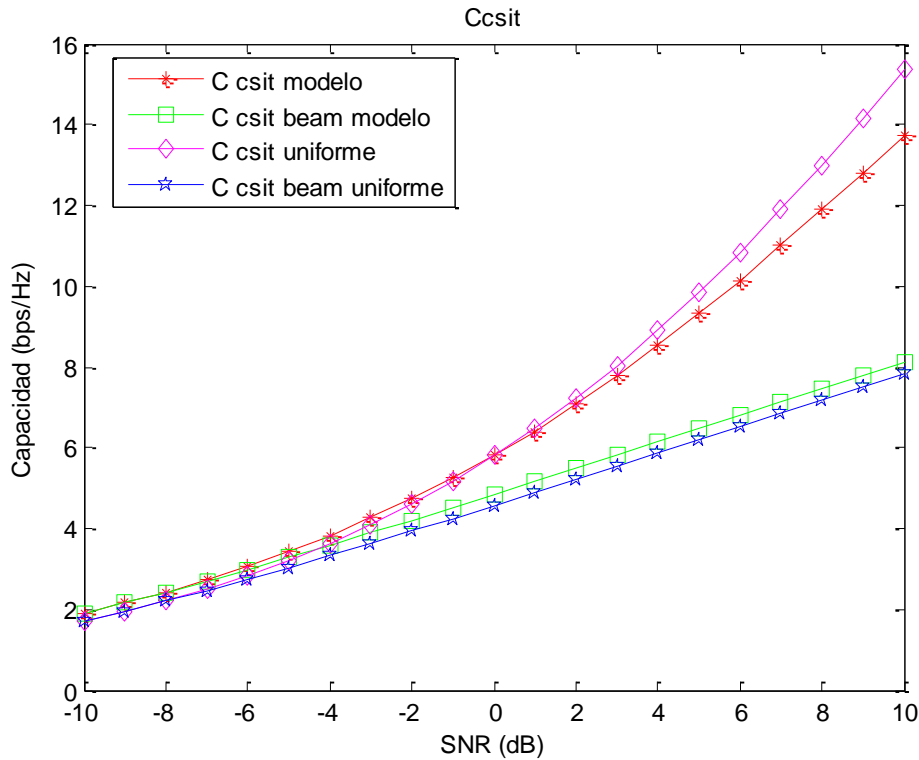


Figura 51: Capacidad CSIT para dispersión angular e) con $M=N=6$

Como en anteriores casos, CSIT siempre tiene una mayor capacidad que CDIT como consecuencia de tener un total conocimiento del canal en el transmisor, siendo esta la única diferencia con respecto al caso de CDIT, ya que las gráficas son casi idénticas. En la Tabla 59 podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCSIT modelo (bps/Hz)	CCSIT BF modelo (bps/Hz)	CCSIT uniforme (bps/Hz)	CCSIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	1.9147	1.9147	1.7137	1.7137
-5	3.4256	3.2870	3.1925	3.0373
0	5.8029	4.8432	5.8132	4.5728
5	9.3206	6.4694	9.8490	6.1917
10	13.7136	8.1192	15.3685	7.8391

Tabla 59: valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular e) con $M=N=6$

5.2.5.3.3 Sin información del canal en el transmisor

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la Figura 7e), en el caso de que no tengamos información del canal, se recoge en la Figura 52.

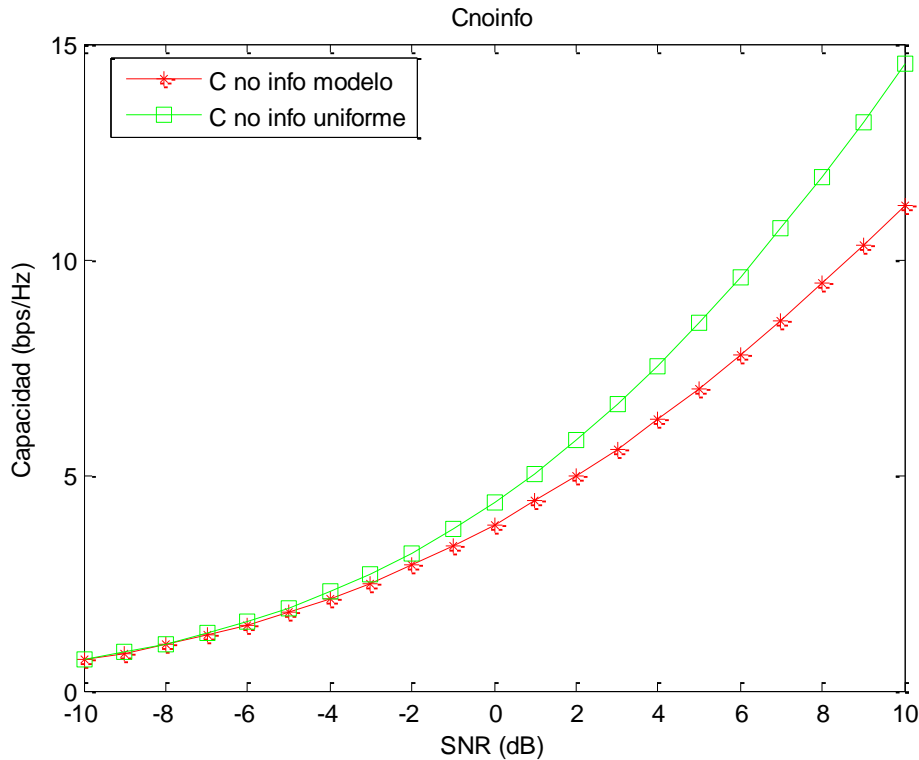


Figura 52: Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular e) con $M=N=6$

En este caso sí que se sigue el mismo camino que para los dos casos anteriores, pero sabiendo siempre que la capacidad siempre va a ser menor que para los casos de CSIT y CDIT, siendo en este caso ostensiblemente menor. En la Tabla 60 podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	C no info modelo (bps/Hz)	C no info uniforme (bps/Hz)
-10	0.7200	0.7261
-5	1.8077	1.9151
0	3.8464	4.3581
5	7.0129	8.5191
10	11.2389	14.5490

Tabla 60: valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular e) con $M=N=6$

5.2.6 Dispersión angular f)

En este apartado, vamos a realizar las simulaciones con la dispersión angular que aparece en la *Figura 7f*), exponiéndose a continuación los resultados obtenidos.

5.2.6.1 M=N=3

En el caso de que tengamos tres antenas tanto en el transmisor como en el receptor, los autovalores de la matriz \mathbf{H} vienen reflejados en la *Tabla 61*.

\mathbf{H} uniforme	2.1374	1.0385	0.7461
\mathbf{H} modelo	2.4967	0.7382	0.1130

Tabla 61: autovalores de la matriz \mathbf{H} para dispersión angular f) con $M=N=3$

En la *Tabla 61* podemos observar cómo, a pesar de ser la última dispersión la menos amplia de todas, para el valor de tres antenas transmisoras y receptoras no se aprecia todavía la disminución de los modos de potencia, existiendo tres modos activos en el caso uniforme y dos modos dominantes en el caso del modelo.

5.2.6.1.1 CDIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7f*), en el caso de CDIT, se recoge en la *Figura 53*.

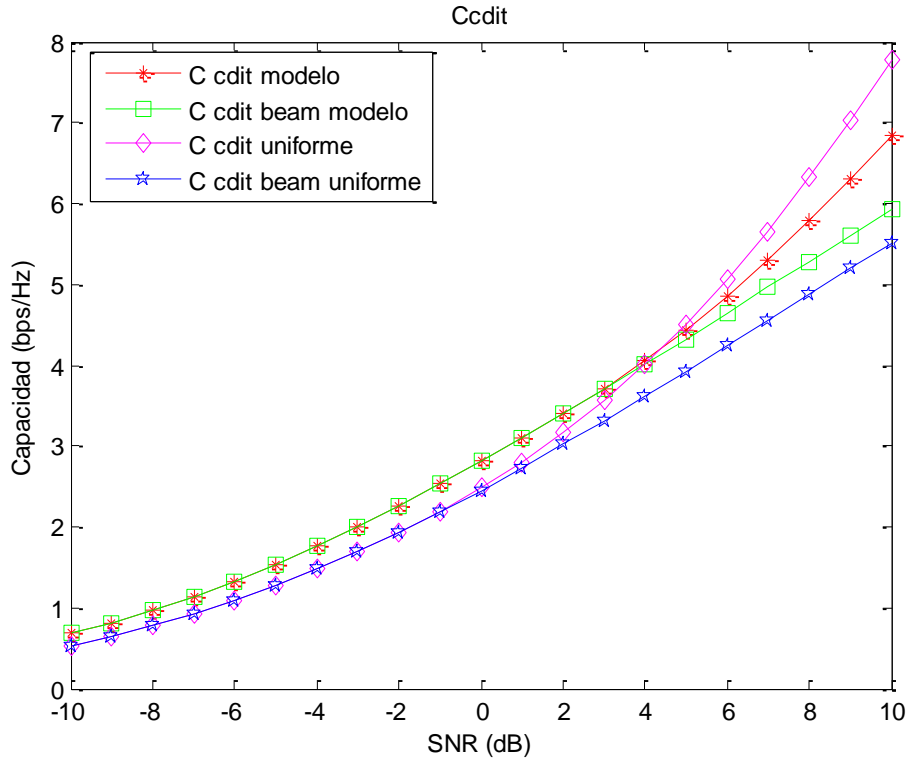


Figura 53: Capacidad CDIT para dispersión angular f) con $M=N=3$

En este caso de dispersión angular llegamos incluso al valor de SNR de 4 dB en el que el caso uniforme consigue superar al modelo, debido a que es la dispersión angular menos amplia y con mayor correlación, lo que hace que empeore el caso uniforme y mejore el BF, ya que el BF a mayor correlación mejor se comporta, llegando incluso el caso del BF uniforme a parecerse al caso uniforme hasta los 3 dB de SNR. Esto no hace más que confirmar que, a medida que hemos ido utilizando una dispersión menos amplia, el BF se ha ido comportando cada vez mejor. En la *Tabla 62* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCDIT modelo (bps/Hz)	CCDIT BF modelo (bps/Hz)	CCDIT uniforme (bps/Hz)	CCDIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	0.6802	0.6802	0.5345	0.5345
-5	1.5385	1.5385	1.2739	1.2740
0	2.8123	2.8123	2.4801	2.4554
5	4.4364	4.3255	4.5048	3.9243
10	6.8365	5.9364	7.7769	5.5188

Tabla 62: valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular f) con $M=N=3$

5.2.6.1.2 CSIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7f)*, en el caso de CSIT, se recoge en la *Figura 54*.

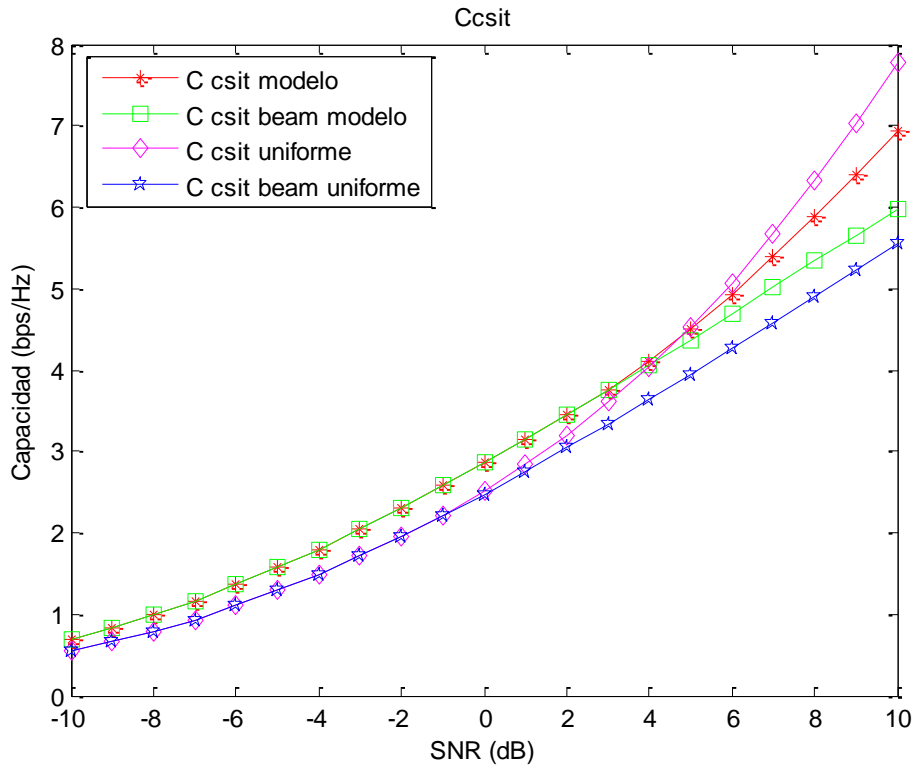


Figura 54: Capacidad CSIT para dispersión angular f) con $M=N=3$

Poco que comentar sobre CSIT, ya que prácticamente se comporta igual que CDIT en este caso. En la *Tabla 63* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCSIT modelo (bps/Hz)	CCSIT BF modelo (bps/Hz)	CCSIT uniforme (bps/Hz)	CCSIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	0.3990	0.6990	0.5428	0.5428
-5	1.5710	1.5710	1.2896	1.2896
0	2.8547	2.8547	2.5041	2.4772
5	4.4977	4.3724	4.5304	3.9492
10	6.9331	5.9849	7.7826	5.5448

Tabla 63: valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular f) con $M=N=3$

5.2.6.1.3 Sin información del canal en el transmisor

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7f)*, en el caso de que no tengamos información del canal, se recoge en la *Figura 55*.

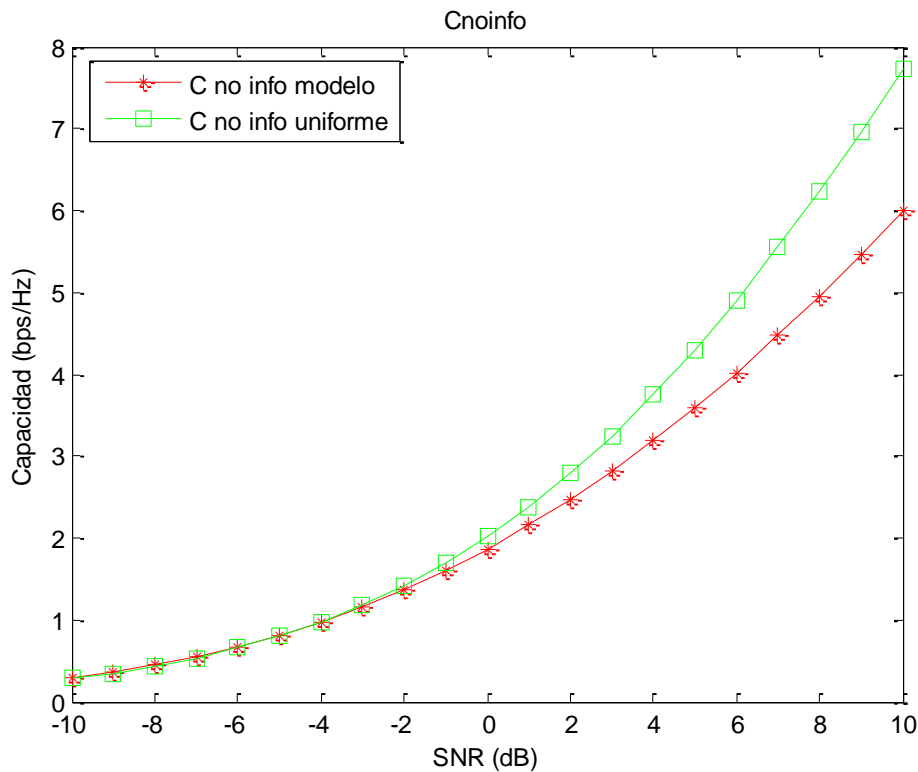


Figura 55: Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular f) con $M=N=3$

En el caso de no tener información sobre el canal en el transmisor, observamos cómo sigue el mismo camino que en apartados anteriores, pero existiendo una mayor diferencia con respecto al modelo que con respecto al caso uniforme. En la *Tabla 64* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	C no info modelo (bps/Hz)	C no info uniforme (bps/Hz)
-10	0.2989	0.2820
-5	0.8111	0.8047
0	1.8688	2.0236
5	3.5945	4.3013
10	5.9988	7.7340

Tabla 64: valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular f) con $M=N=3$

5.2.6.2 M=N=4

En el caso de que tengamos cuatro antenas tanto en el transmisor como en el receptor, los autovalores de la matriz \mathbf{H} vienen reflejados en la *Tabla 65*.

\mathbf{H} uniforme	2.8336	2.1049	0.9409	0.0144
\mathbf{H} modelo	4.4328	0.6131	0.4152	0.0451

Tabla 65: autovalores de la matriz \mathbf{H} para dispersión angular $f)$ con $M=N=4$

Cuando tenemos cuatro antenas transmisoras y receptoras, ya podemos ver como al tener una dispersión angular tan poco amplia, obtenemos un modo dominante muy diferenciado en el caso del modelo, mientras que en el caso uniforme obtenemos tres modos activos de potencia más repartidos. Esto confirma, como se verá de una forma más exagerada con $M=N=6$, que a medida que disminuimos la dispersión, como se ha ido intuyendo a lo largo de las simulaciones, disminuyen los modos de potencia dominantes en el caso del modelo, y dichos modos son mucho mayores en cuanto a valor numérico que los del caso uniforme.

5.2.6.2.1 CDIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7f)*, en el caso de CDIT, se recoge en la *Figura 56*.

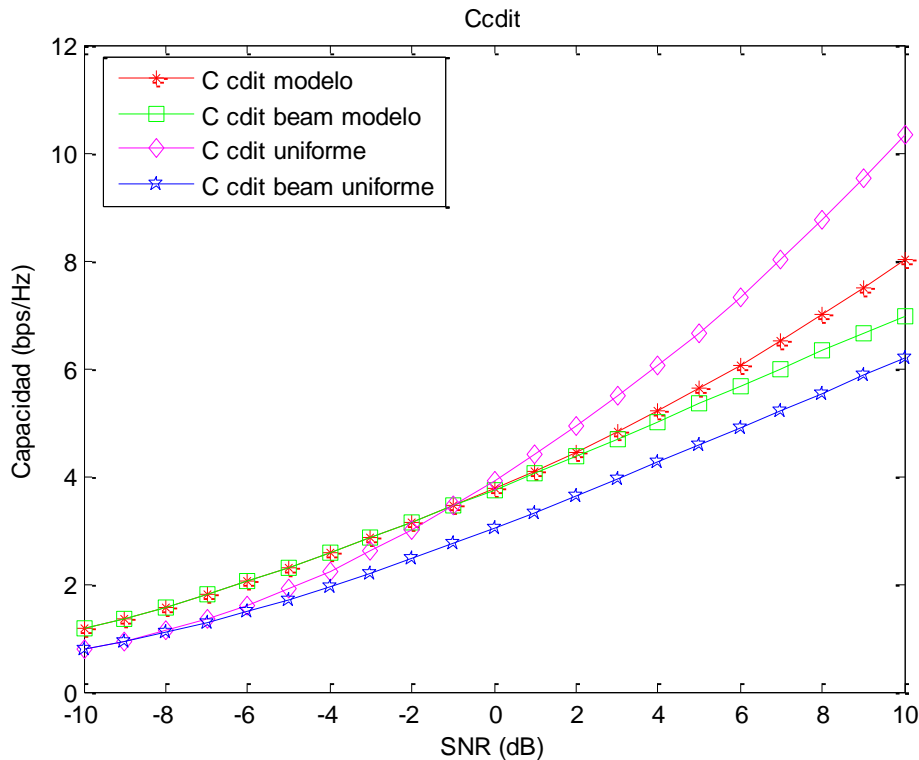


Figura 56: Capacidad CDIT para dispersión angular $f)$ con $M=N=4$

La *Figura 56* no hace más que confirmar lo de apartados anteriores, en este caso, el BF está a la par del modelo hasta 2 dB, debido a la gran correlación existente fruto de la baja dispersión existente. En la *Tabla 66* podemos observar con más detenimiento el

valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCDIT modelo (bps/Hz)	CCDIT BF modelo (bps/Hz)	CCDIT uniforme (bps/Hz)	CCDIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	1.1678	1.1678	0.7865	0.7825
-5	2.3047	2.3052	1.9046	1.7124
0	3.7590	3.7513	3.9148	3.0357
5	5.6252	5.3371	6.6605	4.5711
10	8.0202	6.9735	10.3374	6.1899

Tabla 66: valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular $f)$ con $M=N=4$

5.2.6.2.2 CSIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la Figura 7f), en el caso de CSIT, se recoge en la Figura 57.

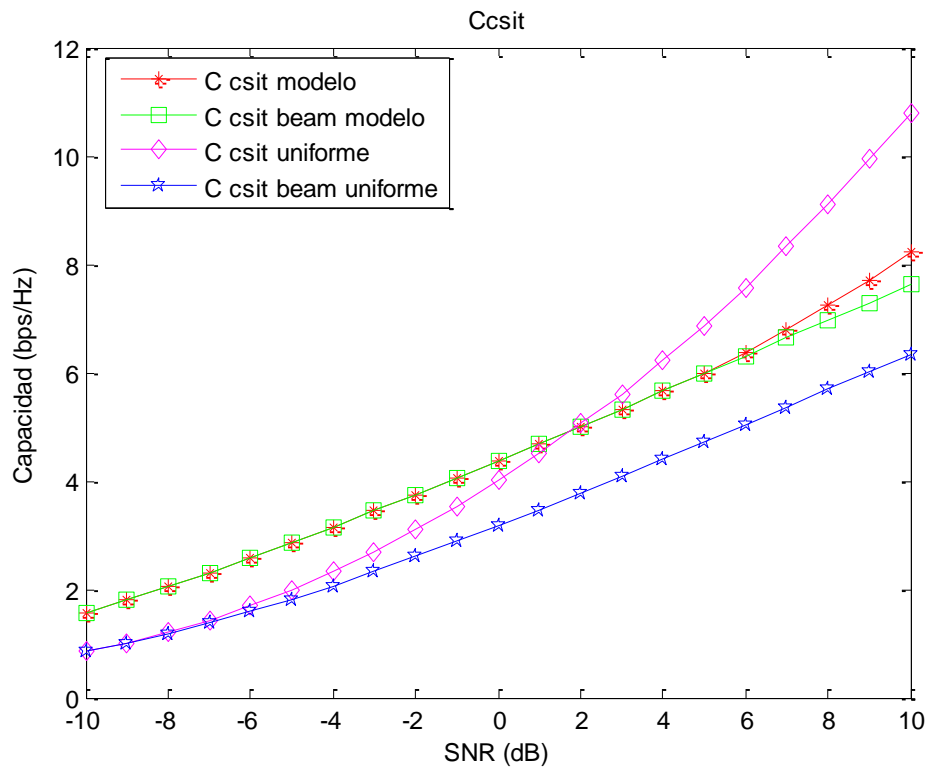


Figura 57: Capacidad CSIT para dispersión angular $f)$ con $M=N=4$

En el caso de CSIT, como podemos observar, incluso se mejoran los valores de SNR en los cuales el BF es parejo al modelo, llegando a un valor en este caso de 5 dB. En la Tabla 67 podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB. Observamos también que cada vez el aumento de la capacidad a medida que aumentamos el número de antenas se va haciendo menos evidente.

SNR (dB)	CCSIT modelo (bps/Hz)	CCSIT BF modelo (bps/Hz)	CCSIT uniforme (bps/Hz)	CCSIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	1.5680	1.5680	0.8504	0.8504
-5	2.8508	2.8508	1.9820	1.8234
0	4.3680	4.3680	4.0193	3.1746
5	5.9933	5.9804	6.8665	4.7220
10	8.2250	7.6257	10.7852	6.3451

Tabla 67: valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular f) con $M=N=4$

5.2.6.2.3 Sin información del canal en el transmisor

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la Figura 7f), en el caso de que no tengamos información del canal, se recoge en la Figura 58.

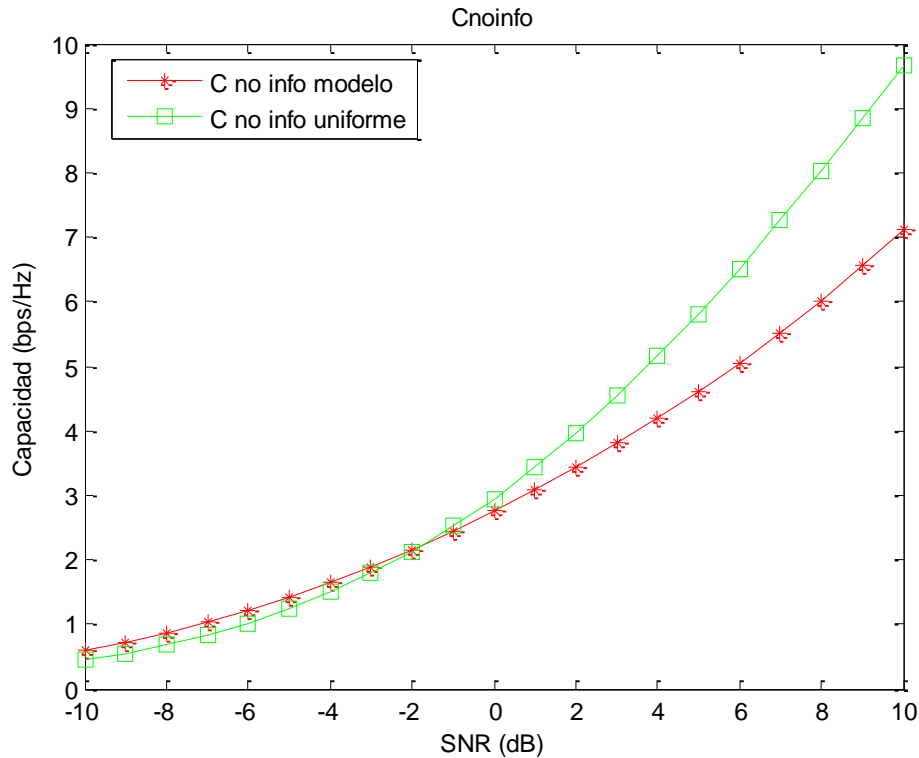


Figura 58: Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular f) con $M=N=4$

En este caso, el modelo funciona mejor que el caso uniforme hasta una SNR de -2 dB, mejorando en 1 dB el caso de $M=N=3$. Como en las demás simulaciones, el valor de la capacidad es menor que para CDIT y CSIT. En la Tabla 68 podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	C no info modelo (bps/Hz)	C no info uniforme (bps/Hz)
-10	0.5963	0.4471
-5	1.4145	1.2400
0	2.7550	2.9527
5	4.6095	5.8138
10	7.1278	9.6763

Tabla 68: valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular f) con $M=N=4$

5.2.6.3 $M=N=6$

En el caso de que tengamos seis antenas tanto en el transmisor como en el receptor, los autovalores de la matriz \mathbf{H} vienen reflejados en la *Tabla 69*.

\mathbf{H} uniforme	3.7608	2.6223	2.4147	1.6561	1.0400	0.0837
\mathbf{H} modelo	6.7194	1.9024	0.6135	0.3589	0.1378	0.0879

Tabla 69: autovalores de la matriz \mathbf{H} para dispersión angular f) con $M=N=6$

En este caso es en el que se hace más evidente la diferencia entre modos, ya que obtenemos dos modos dominantes y un posible tercero para el modelo, mientras que para el caso uniforme se obtienen cinco modos activos. Como ya se dijo anteriormente, esto es consecuencia de tener una dispersión angular poco amplia, lo que conlleva a una alta correlación, haciendo que funcione mejor el BF.

5.2.6.3.1 CDIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la *Figura 7f*), en el caso de CDIT, se recoge en la *Figura 59*.

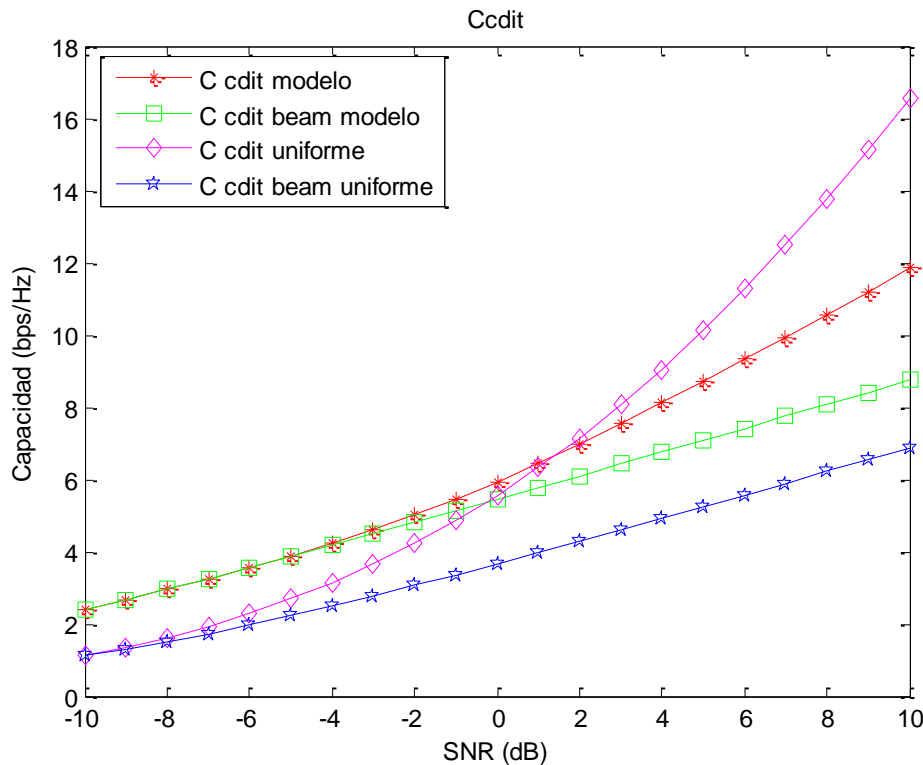


Figura 59: Capacidad CDIT para dispersión angular f) con $M=N=6$

En la *Figura 59* observamos que incluso se ha mejorado el rango de SNR en el cual el BF está por encima del caso uniforme, llegando a 0 dB. En la *Tabla 70* podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCDIT modelo (bps/Hz)	CCDIT BF modelo (bps/Hz)	CCDIT uniforme (bps/Hz)	CCDIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	2.3976	2.3976	1.1389	1.1137
-5	3.8639	3.8580	2.6855	2.2267
0	5.9448	5.4493	5.5596	3.6598
5	8.7126	7.0875	10.1227	5.2406
10	11.8845	8.7412	16.5352	6.8752

Tabla 70: valores principales de la capacidad con CDIT para dispersión angular f) con $M=N=6$

5.2.6.3.2 CSIT

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la Figura 7f), en el caso de CSIT, se recoge en la Figura 60.

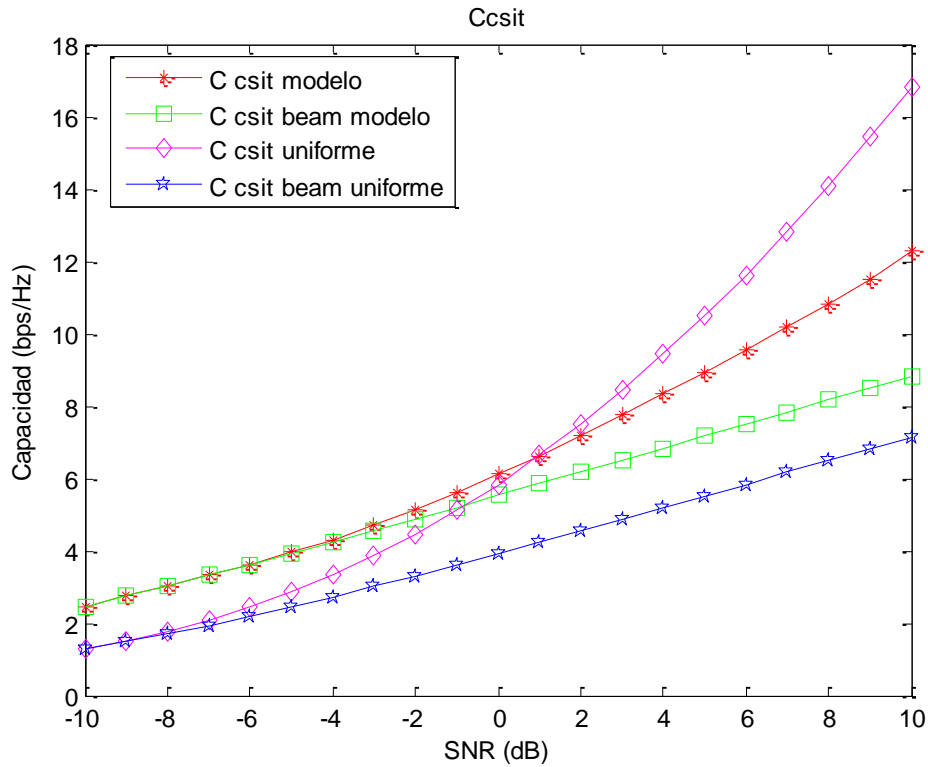


Figura 60: Capacidad CSIT para dispersión angular f) con $M=N=6$

Como comentario nuevo, aparte de los ya mencionados anteriormente sobre la diferencia entre CSIT y CDIT, podemos decir que, con esta dispersión, la diferencia entre los dos BF ha aumentado, lo cual era de esperar, ya que el BF del modelo se adecúa más que el del caso uniforme. En la Tabla 71 podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	CCSIT modelo (bps/Hz)	CCSIT BF modelo (bps/Hz)	CCSIT uniforme (bps/Hz)	CCSIT BF uniforme (bps/Hz)
-10	2.4634	2.4634	1.2809	1.2716
-5	3.9481	3.9334	2.8726	2.4522
0	6.1059	5.5283	5.8398	3.9206
5	8.9345	7.1677	10.4802	5.5149
10	12.2741	8.8218	16.8343	7.1542

Tabla 71: valores principales de la capacidad con CSIT para dispersión angular f) con $M=N=6$

5.2.6.3.3 Sin información del canal en el transmisor

La simulación de la capacidad para la dispersión angular de la Figura 7f), en el caso de que no tengamos información del canal, se recoge en la Figura 61.

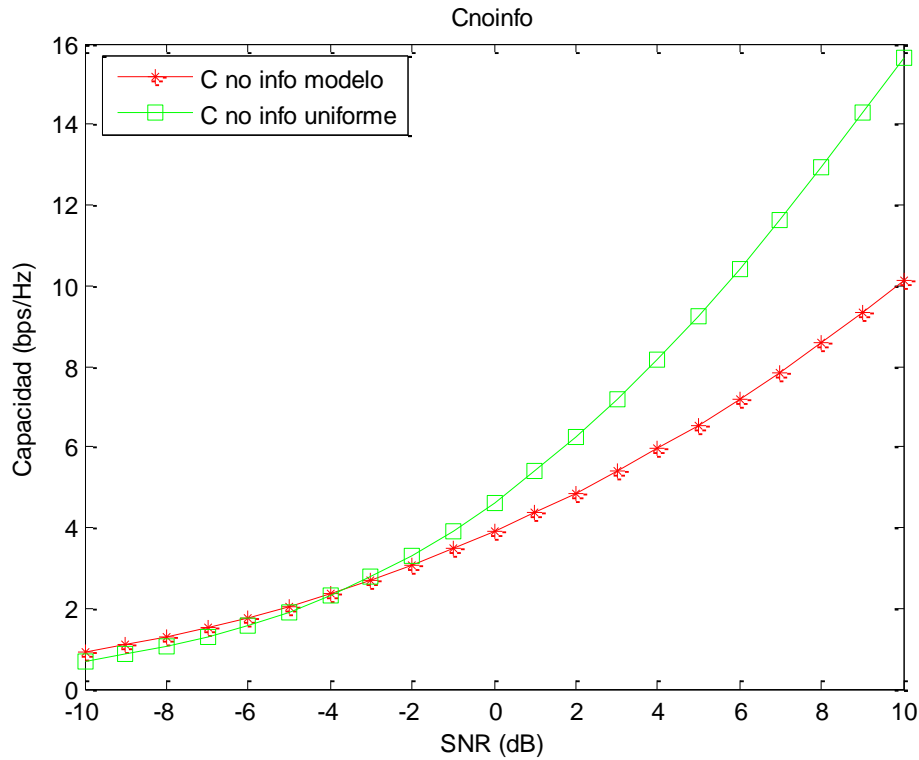


Figura 61: Capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular f) con $M=N=6$

Se sigue la senda de los anteriores casos, siendo cada vez más evidente la diferencia entre el modelo y el caso uniforme. En la Tabla 72 podemos observar con más detenimiento el valor de la capacidad en todos los casos, para los valores de SNR de -10, -5, 0, 5 y 10 dB.

SNR (dB)	C no info modelo (bps/Hz)	C no info uniforme (bps/Hz)
-10	0.9067	0.6861
-5	2.0489	1.9116
0	3.8975	4.6124
5	6.5479	9.2613
10	10.1131	15.6617

Tabla 72: valores principales de la capacidad sin información del canal en el transmisor para dispersión angular f) con $M=N=6$

Capítulo 6

Conclusiones y líneas futuras

6.1 Conclusiones

Una vez realizado el estudio de las prestaciones en el escenario propuesto, se exponen las siguientes conclusiones del mismo:

- Para valores de SNR bajas, en la mayoría de los casos propuestos el modelo en milimétricas simulado funciona mejor que el caso en el cual se utilizaba una dispersión angular uniforme, tanto en el caso de utilizar BF como en el caso de no utilizarlo.
- A medida que vamos aumentando el valor de la SNR, vamos observando cómo, utilizando una dispersión angular uniforme, obtenemos mejores resultados.
- En las simulaciones se fue haciendo un barrido desde la dispersión angular más amplia a la menos amplia, obteniendo como resultado el ir mejorando el valor de SNR al cual el modelo dejaba de ser mejor opción que el caso uniforme. Esto se debe a que, a menor dispersión, existe una mayor correlación y el modelo, tanto en el caso de utilizar BF como en el caso que no se utilizaba, va obteniendo una mejor respuesta como consecuencia de dicha mayor correlación.
- En el caso de utilizar BF para el modelo, la anterior conclusión es realmente válida, ya que el BF funciona mejor a medida que la dispersión es más

estrecha, es decir, se tiene una mayor correlación. Para SNR bajas, como se ha ido observando a medida que realizábamos las simulaciones, el BF ha ido funcionando cada vez mejor, llegando a obtener en algunos casos incluso en valores de SNR de 4 dB mejor comportamiento que en el caso de utilizar una dispersión angular uniforme.

- En el caso de utilizar BF con una dispersión angular uniforme, como era de esperar, los resultados son siempre peores que para todos los demás casos, ya que apenas tenemos correlación correlación, teniendo como consecuencia el obtener dichos peores resultados.
- Cuando se tiene un total conocimiento del canal en el transmisor, se obtienen mejores resultados que en los casos en los que solo se conoce la distribución estadística del canal o, en el caso más extremo, cuando no se conoce información alguna acerca del mismo. En el caso en el que conocemos la distribución estadística del canal, sin embargo, nos acercamos en gran medida a los resultados del caso en el que se conoce totalmente el canal, como consecuencia de que el algoritmo utilizado para distribuir la potencia obtiene unos resultados parecidos.
- Lo que es más que evidente, a tenor de los resultados, es la diferencia entre los casos CDIT y CSIT y el caso de no tener información del canal, ya que la diferencia es más acusada.

6.2 Líneas futuras

Las líneas futuras a desarrollar más adelante podrían ser las siguientes:

- Introducir en el modelo de canal el efecto de las antenas.
- Estudios a nivel de sistema, incluyendo varias BTS.
- Ampliar el modelo de canal a tres dimensiones.
- Medir otras prestaciones, como puede ser el caso de la tasa de error binario (BER).

Capítulo 7

Presupuesto

Fecha de comienzo: Octubre 2013

Fecha de finalización: Julio 2014

El proyecto está dividido en las siguientes fases, con la siguiente distribución entre cada una de ellas:

- Estudio: desde Octubre de 2013 hasta Diciembre de 2013 (3 meses).
- Desarrollo analítico: desde Enero de 2014 hasta Marzo de 2014 (3 meses).
- Implementación del proyecto en MATLAB®: desde Abril de 2014 hasta Mayo de 2014 (2 meses).
- Documentación: desde Junio de 2014 hasta mediados de Julio de 2014 (1 mes y medio).

Sumando cada una de las partes del mismo, nos da un total de 9 meses y medio de duración del proyecto. Para el computo del presupuesto vamos a basarnos en los recursos humanos, es decir, en las horas realizadas por el autor del proyecto y en las horas realizadas por el tutor/gerente del mismo, que se corresponden con un 10% de las horas realizadas por el autor.

Para el cálculo de las horas realizadas por el autor del proyecto, utilizaremos una media de 5 horas trabajadas a la semana, si bien no se sigue siempre esa media, ya que algunas semanas se ha trabajado más y otras menos, pero para el cálculo del presupuesto hemos optado por realizar la media de horas a la semana.

En la *Tabla 73* se realiza el desglose de horas realizadas en cada una de las fases del proyecto para el autor del mismo, terminando la tabla con la suma de todas las semanas y las horas empleadas.

Fase	Semanas	Horas
Estudio	13	65
Desarrollo	13	65
Implementación	9	45
Documentación	6	30
Total	41	205

Tabla 73: desglose de horas realizadas en cada una de las fases del proyecto por el autor

En el caso del tutor/gerente del proyecto, en la *Tabla 74* observamos su desglose.

Fase	Semanas	Horas
Estudio	1.3	6.5
Desarrollo	1.3	6.5
Implementación	0.9	4.5
Documentación	0.66	3.0
Total	4.1	20.5

Tabla 74: desglose de horas realizadas en cada una de las fases del proyecto por el tutor/gerente

Una vez realizados los dos desgloses, para realizar el presupuesto hay que saber el salario/hora del autor del proyecto y del tutor/gerente. En el caso del autor del proyecto, un estudiante de Ingeniería de Telecomunicaciones, el salario medio por hora es de aproximadamente 7 €/hora mientras que, en el caso del tutor/gerente, el salario medio es de aproximadamente 33 €/hora. En la *Tabla 75* aparece el presupuesto total de cada una de las partes.

	Horas	Coste (€/hora)
Autor	205	7
Gerente	20.5	33

Tabla 75: horas realizadas y coste por hora de cada una de las partes

Multiplicando las horas realizadas por cada parte por el coste, obtenemos un coste total del proyecto de **2111.5 €**.

Capítulo 8

Bibliografía

- [1] G. J. Foschini and M.J. Gans, *On limits of Wireless Communications in a Fading Environment when using Multiple Antennas*, Wireless Personal Communications, vol.6, pp. 311-335, Marzo 1998.
- [2] Silvina A. Grupalli, M. A. Cabrera, J. D. Bilbao, M. G. Ferreyra, *Sistemas de comunicación inalámbricos con tecnología MIMO*. Dpto de Electricidad, Electrónica y Computación. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Tucuman, Argentina, 2012.
- [3] Oscar Fernández Hernández. *Caracterización experimental y modelado de canal MIMO para aplicaciones WLAN y WPAN*. Tesis Doctoral Universidad de Cantabria, Mayo 2007.
- [4] Massimiliano Comisso, *Beamforming Techniques for Wireless Communications in Low-Rank Channels: Analytical Models and Synthesis Algorithms*. Tesis Doctoral Università Degli Studi Trieste, 2003.
- [5] Zhouyue Pi, Farooq Khan, *An Introduction to Millimeter-Wave Mobile Broadband Systems*. IEEE Communications Magazine, Junio 2011.
- [6] Matilde Sánchez Fernández, Santiago Zazo, Reinaldo Valenzuela, *Performance comparison between beamforming and spatial multiplexing for the downlink in wireless cellular systems*. IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 8, no. 7, Julio 2007.

- [7] Bruno Clerckx, Claude Oestges, *MIMO Wireless Networks: Channels, Techniques and Standards for Multi-Antenna, Multi-User and Multi-Cell Systems (Second Edition)*. Elsevier, 2013
- [8] Comunicaciones móviles, *Sistemas celulares: evolución de 3G*, Universidad Politécnica de Madrid
- [9] Ezio Biglieri, Robert Calderbank, Anthony Constatinides, Andrea Goldsmith, Arogyaswami Paulraj, H. Vincent Poor, *MIMO Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2005.
- [10] Pablo Aguilera Bonet, *Estudio de Sistemas MIMO a través de técnicas de procesamiento de señal y teoría de la información*. Proyecto fin de Máster Universidad de Sevilla, Noviembre de 2009.
- [11] A. Tulino, A. Lozano, S. Verdú, *Capacity-achieving input covariance for single user multi-antenna channels*. IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 51, pp. 2491-2509, Julio 2005.
- [12] Suiyan Geng, Jarmo Kivinen, Xiongwen Zhao, Pertti Vainikainen, *Millimeter-Wave Propagation Channel Characterization for Short Range Wireless Communications*. IEEE Transactions on vehicular Technology, vol. 58, No 1, Enero 2009.
- [13] Theodore S. Rappaport, James N. Murdock, Felix Gutierrez, *State of the Art in 60 GHz Integrated Circuits and Systems for Wireless Communications*. Proceedings of the IEEE, vol. 99, No 8, Agosto 2011.